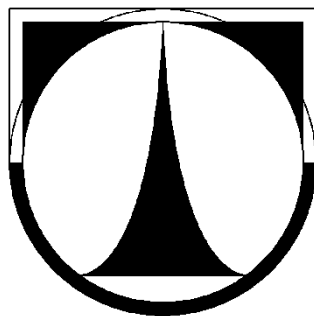


Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní



Pavel Kronus

VLIV PROPUSTNÉHO PÁSMU POHONU NA DYNAMICKOU PODDAJNOST

Diplomová práce

2010

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor : Výrobní systémy

Zaměření : Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

**VLIV PROPUSTNÉHO PÁSMU POHONU NA DYNAMICKOU
PODDAJNOST**
INFLUENCE OF BANDPASS ON DYNAMICAL FLEXIBILITY

KVS - VS - 207

Pavel Kronus

Vedoucí práce : Ing. Radomír Medřický, Ph.D

Konzultant: Prof. Ing. Jan Skalla, CSc.

Počet stran : 68

Počet příloh : 3

Počet obrázků : 58

Počet tabulek : 3

V Liberci 28. 5. 2010

TÉMA : Vliv propustného pásma pohonu na dynamickou poddajnost

ANOTACE : Diplomová práce obsahuje model servopohonu v programu Matlab s nadstavbou Simulink. Pomocí uvedeného programu jsou seřizována propustná pásma rychlostní smyčky a zkoumán jejich vliv na dynamickou poddajnost pohonu.

THEME : INFLUENCE OF BANDPASS ON DYNAMICAL FLEXIBILITY

ANOTAION: The diploma thesis contains a model of servodrive in Matlab programme with Simulink extension. The programme is used for tuning bandpass of velocity loop and examining their influence on dynamical flexibility of a servodrive.

Klíčová slova: SIMULACE, SERVOPOHON, PROPUSTNÉ PÁSMO, DYNAMICKÁ PODDAJNOST

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno : 2010

Archivní označení zprávy :

Počet stran : 68

Počet příloh : 3

Počet obrázků : 58

Počet tabulek : 3

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 28. 5. 2010

Podpis

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Radomíru Medřickému, Ph.D. a konzultantovi Prof. Ing. Janu Skallovi, CSc. za ochotu, trpělivost při konzultacích, cenné rady a připomínky při psaní této práce.

OBSAH

Přehled použitých symbolů a zkratk	8
1. Úvod	10
2. Dynamická poddajnost	11
2.1. Propustné pásmo pohonu	13
3. Chyby při interpolaci na CNC	15
3.1. Chyby při lineární interpolaci	15
3.2. Chyby při kruhové interpolaci.....	17
3.3. Chyby poloměru při kruhové interpolaci	18
3.4. Kvadrantové chyby při kruhové interpolaci.....	20
3.4.1. Kompenzace kvadrantových chyb.....	21
4. Rozbor současné techniky pohonů	23
4.1 YASKAWA	23
4.1.1. YASKAWA SIGMA II.....	24
4.1.2. YASKAWA SIGMA V.....	25
4.2. KOLLMORGEN – AKD	26
4.3. OMRON – ACCURAX G5.....	29
5. Regulace pohonu	31
5.1. Proudová smyčka	31
5.2. Rychlostní smyčka	31
5.3. Polohová smyčka.....	32
6. Sestavení blokových schémat pohonu	36
6.1. MATLAB a Simulink.....	36
6.2. Seřízení rychlostní smyčky (s náhradním přenosem)	36
6.3. Seřízení polohové smyčky (s náhradním přenosem).....	48
6.4. Závislost na stoupání šroubu	49
7. Výpočet dynamické poddajnosti	53
8. Dvuhmotový model motoru	55
8.1. Odvození přenosu pro dvuhmotový model motoru.....	55
8.2. Polohová a rychlostní smyčka	57

9. Závěr.....	63
Seznam použité literatury.....	64
10. Přílohy	65

Přehled použitých symbolů a zkratk

c_R	[m/N]	rázová dynamická poddajnost
b	[N/m]	tlumení
c	[1]	poměr polohových zesílení
c_R	[m/N]	rázová dynamická poddajnost
f_0	[Hz]	frekvence propustného pásma rychlostní smyčky
f_n	[Hz]	frekvence zlomu rychlostního regulátoru
f_{0i}	[Hz]	frekvence propustného pásma proudové smyčky
F_t	[N]	třecí síla
F_{ext}	[N]	externí zatěžující síla
F_{ext0}	[N]	amplituda harmonicky proměnné zatěžující síly
h_s	[m/ot]	stoupání šroubu
J	[kg/m ²]	moment setrvačnosti
J_1	[kg/m ²]	moment setrvačnosti balení plechů
J_2	[kg/m ²]	moment setrvačnosti hřídele
k	[N/m]	konstanta tuhosti
K_C	[m/rad]	celkový mechanický převod
K_m	[Vs/rad] [Nm/A]	konstanta motoru
K_P	[As/rad] [As/m]	zesílení rychlostního regulátoru
K_R	[1/s]	zesílení rychlostní smyčky
k_R	[N/m]	rázová dynamická tuhost
K_V	[1/s]	zesílení polohové smyčky
K_{vx}	[1/s]	polohové zesílení souřadnice „X“
K_{vy}	[1/s]	polohové zesílení souřadnice „Y“
r_0	[m]	poloměr interpolované křivky
Δr_0	[m]	změna poloměru interpolované křivky
T	[s]	časová konstanta náhradního přenosu
T_n	[s]	časová konstanta rychlostního regulátoru
v	[m/s]	skutečná rychlost
v_B	[m/s]	objížděcí rychlost

v_x	[m/s]	rychlost souřadnice „X“
v_y	[m/s]	rychlost souřadnice „Y“
v_z	[m/s]	žádaná rychlost
w	[m]	žádaná poloha
x	[m]	skutečná poloha
x_w	[m]	programovaná poloha souřadnice „X“
x_{e0}	[m]	polohová odchylka
y	[m]	skutečná poloha souřadnice „Y“
y_e	[m]	polohová odchylka souřadnice „Y“
y_w	[m]	programovaná poloha souřadnice „Y“
ε_1	[rad/s ²]	zrychlení rotorového paketu
ε_m	[rad/s ²]	zrychlení na hřídeli motoru
ξ	[1]	poměrné tlumení
ω	[rad/s]	úhlová rychlost objížděného poloměru
Ω	[rad/s]	vlastní frekvence kmitavého členu 2. řádu

PI	proporcionálně integrační
CNC	computer numeric control
JQA	japan quality association
AKD	pohony firmy KOLLMORGEN
AKM	motory firmy KOLLMORGEN
GMK	geometrická místa kořenů

1. Úvod

Cílem této práce je vytvořit model servopohonu s rotačním motorem v programu Matlab/Simulink. Na tomto modelu následně ověřit vliv propustného pásma rychlostní smyčky na polohovou odchylku resp. na dynamickou poddajnost.

Dynamika rychlostní smyčky servomechanismů byla (do roku 2000) na úrovni propustného pásma do $f_0 = 100$ Hz. Po roce 2000 se objevily pohony s frekvencí propustného pásma rychlostní smyčky rovnající 400Hz (např. pohon Sigma II firmy YASKAWA) a po roce 2005 dokonce $f_0 = 1,6$ až 2 kHz (např. pohon Sigma V firmy YASKAWA, AKD firmy KOLLMORGEN,...). V návaznosti uvedených změn bylo úkolem práce zjistit vliv propustného pásma (až do hodnoty 1,6 kHz) na dynamickou poddajnost.

2. Dynamická poddajnost

Jak je známo statická dynamická poddajnost servomechanismu je nulová. Tzn. že pokud vnější zatížení nepřesáhne maximální velikost točivého momentu resp. síly mototru, servomechanismus se po odeznění přechodového děje vyvolaného změnou zatížení vrátí do žádané polohy – polohová odchylka je rovna nule. Ve vlastním servopohonu (tzn. část servomechanismu, která je uvnitř polohové smyčky) mohou vzniknout pouze dynamické odchylky od žádané polohy, které regulátory po určitém čase vyrovnají. Tento čas dosahuje maximálně několik desetin sekundy. Výrobci tuto veličinu neudávají, pro popis chování polohového servomechanismu je však hodnota této veličiny jeden z nejdůležitějších parametrů.

Dynamickou poddajnost definujeme dvojím způsobem:

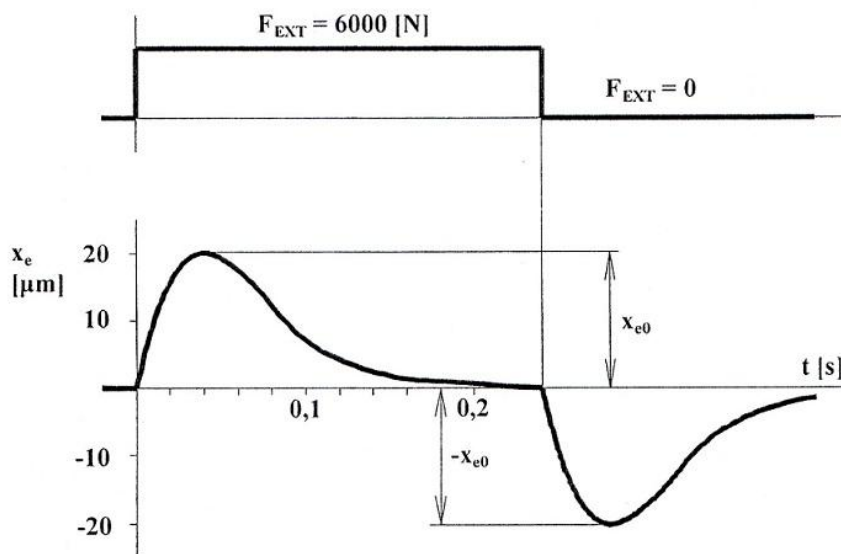
1) Rázová dynamická poddajnost

Se zjišťuje z odezvy pohonu na skokovou změnu zatížení. To odpovídá v praxi např. rychlému najetí nástroje do obrobku. Rázová dynamická poddajnost je definována jako poměr polohové odchylky x_{e0} a síly externí zatěžující suport F_{ext} :

$$c_R = \frac{x_{e0}}{F_{ext}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{N}} \right]$$

Převrácená hodnota dynamické poddajnosti je dynamická tuhost. Její předpis tedy je:

$$k_R = \frac{1}{c_R} = \frac{F_{ext}}{x_{e0}} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$



Obr. č. 1 - Odezva polohového servopohonu na skokovou změnu zatížení

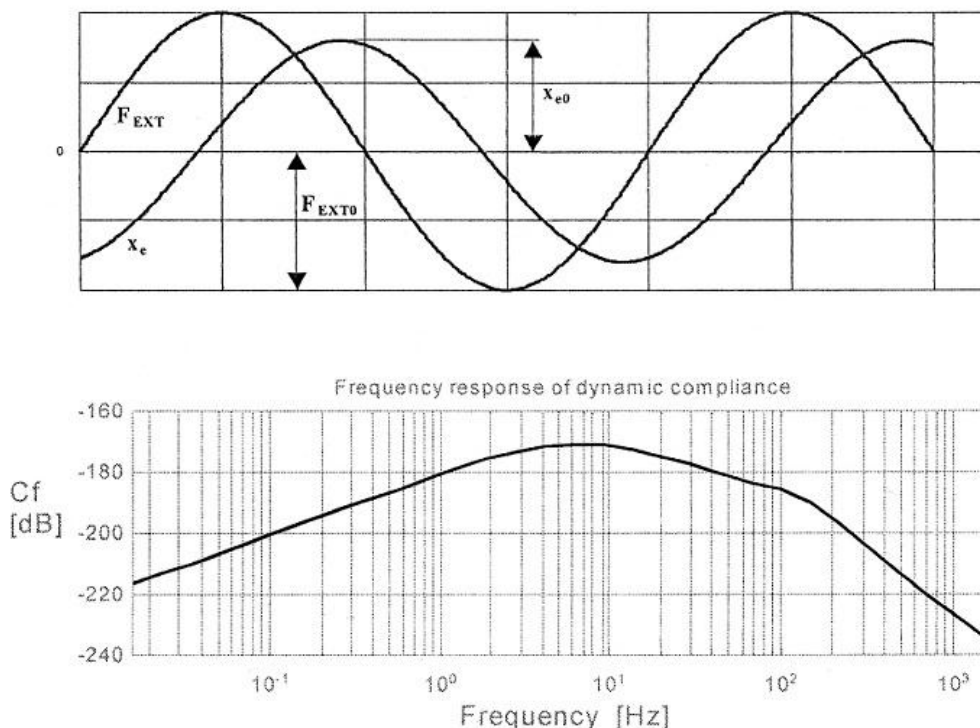
2) Frekvenční dynamická poddajnost

Se zjišťuje z odezvy pohonu na harmonicky proměnnou zatěžující sílu. Tomuto stavu se v praxi přibližuje každé frézování a např. soustružení drážkové hřídele. Budící frekvence je potom dána počtem břitů frézy resp. počtem drážek hřídele.

Frekvenční dynamická poddajnost je popsána jako poměr amplitudy polohové odchylky x_{e0} a amplitudy harmonicky proměnné zatěžující síly F_{ext0} :

$$c_F = \frac{x_{e0}}{F_{ext0}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{N}} \right]$$

Tato veličina je funkcí frekvence budící síly a obvykle ji zobrazujeme v logaritmických souřadnicích viz. obr. č. 2.



Obr. č. 2 - Frekvenční dynamická poddajnost

Pohon při zatěžování harmonicky proměnnou silou F_{ext} (průběh síly je sinusový) reaguje tak, že polohová odchylka x_e také kmitá takřka sinusově. Průběh síly a polohové odchylky jsou vůči sobě fázově posunuty viz obr. č. 2. Při nízkých frekvencích budící síly jsou polohové odchylky velmi malé a poddajnost pohonu je tedy velmi malá. S rostoucí frekvencí zatěžující síly klesá schopnost regulátorů vyrovnávat vznikající polohy a úměrně tomu roste poddajnost pohonu (viz. obr. č. 2 pásmo frekvencí do 10 Hz). Maximum dynamické poddajnosti se u klasických pohonů zpravidla nalézá v rozmezí frekvencí 3 ÷ 30 Hz. Při frekvencích nad 10 Hz dynamická poddajnost pohonu opět klesá => začíná se uplatňovat vliv setrvačných hmot, které pohonu nedovolí sledovat vysoké frekvence.

Z hlediska konstrukce je důležitá skutečnost, že dynamická poddajnost ve svém maximu je nepřímo úměrná celkovému momentu setrvačnosti. U pohonu posuvů tedy z hlediska dynamické poddajnosti nemá velký význam používání motorů s magnety na bázi vzácných zemin, které se vyznačují velmi nízkým momentem setrvačnosti.

2.1. Propustné pásmo pohonu

Propustné pásmo zde uvádíme jako parametr vlastního pohonu, tzn. pohonu pouze v rychlostní smyčce, bez polohové vazby a bez zátěže.

Teorie regulace definuje propustné pásmo jako největší frekvenci sinusového vstupního signálu, při kterém amplituda výstupního signálu (zpravidla napětí tachodynamy) neklesne více než o 3dB a při které fázový posuv výstupního signálu vůči vstupnímu neklesne pod mínus 90° . Jinak řečeno, propustné pásmo je určeno nejvyšší frekvencí vstupního signálu, kterou pohon ještě dokáže bez většího zkreslení sledovat. Velikost propustného pásma v podstatě určuje rychlost, kterou je pohon schopen reagovat na změny vstupních a poruchových signálů. Propustné pásmo zjistíme měřením frekvenční charakteristiky vlastního pohonu.

3. Chyby při interpolaci na CNC

3.1. Chyby při lineární interpolaci

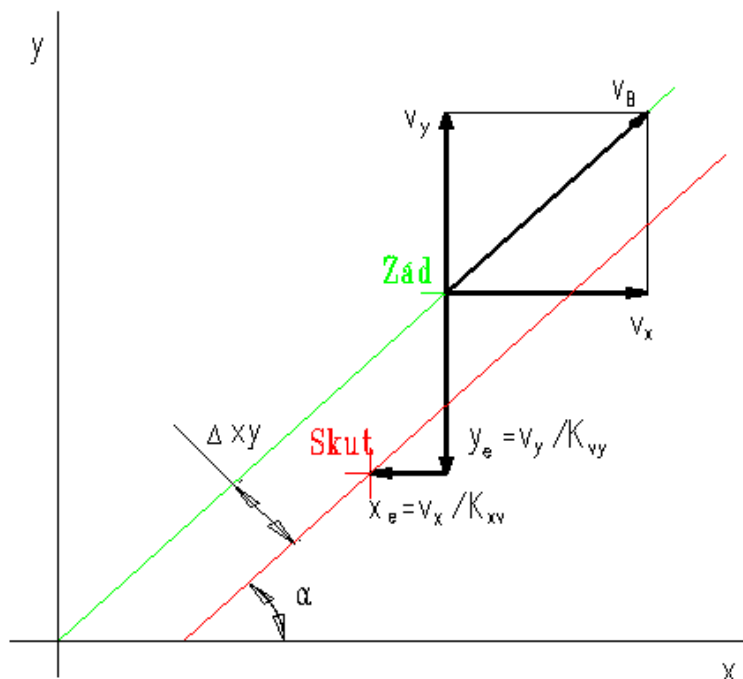
Při lineární interpolaci vznikají v zásadě chyby dvojího druhu:

- 1) Vlivem nesterlných polohových zesílení interpolujících servomechanismů
- 2) Vlivem nesterlné dynamiky interpolujících servomechanismů

Při běžných posuvových rychlostech do 1m/min a zrychleních do 2 m/s² mají větší význam pouze chyby uvedené v bodě 1). Jak je znázorněno na obr. 3, při nesterlných polohových zesíleních interpolujících souřadnic K_{vx} a K_{vy} vzniká chyba tvaru – posunutí skutečné dráhy vůči programované přímce. Chyba je způsobena tím, že sledovací odchylky x_e a y_e vlivem nesterlných hodnot K_v posunou bod, ve kterém se nachází servomechanismus („Skut“), mimo programovanou dráhu. Sledovací odchylky vznikají za pohybu a platí pro ně následující:

$$x_e = x_w - x = \frac{v_x}{K_{vx}}$$

$$y_e = y_w - y = \frac{v_y}{K_{vy}}$$



Obr. č. 3 – Paralelní odlehlost při lineární interpolaci

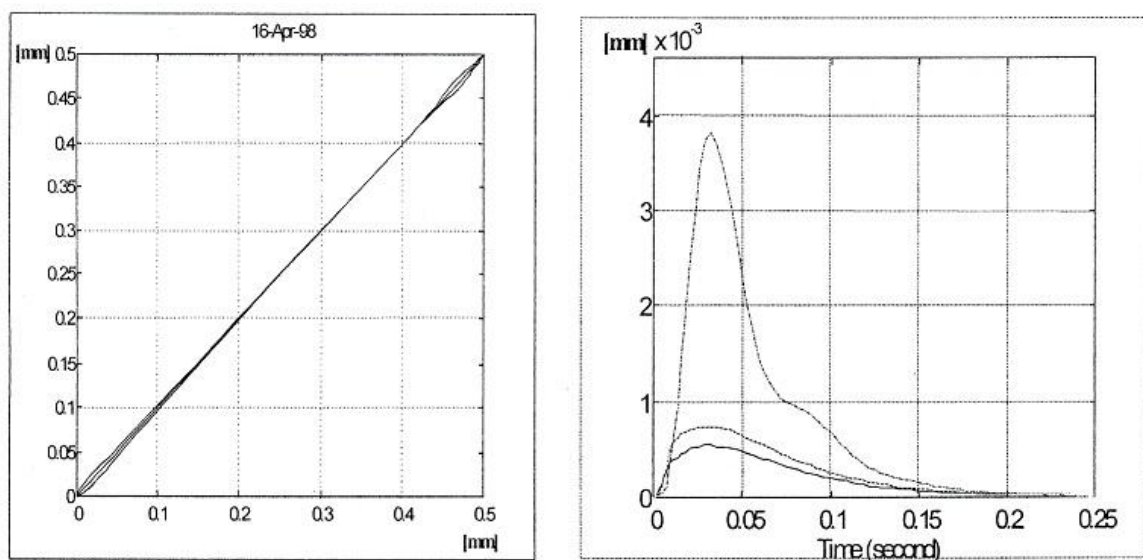
Závislost chyby na objížděcí rychlosti v_B a poměru polohových zesílení c lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta xy = \frac{v_B}{2 \cdot K_{vx}} \left| \frac{1-c}{c} \right| \sin 2\alpha$$

$$c = \frac{K_{vy}}{K_{vx}}$$

Jiný typ chyby vzniká vlivem nestejné dynamiky interpolujících servomechanismů (bod 2). Interpolující souřadnice totiž zpravidla mají různé hmotnosti, nebo tuhosti a z toho důvodu také různou dynamiku. Vysoká zrychlení při rozběhu, zastavení nebo při změně rychlosti vybudí kmity interpolujících souřadnic, a protože amplituda a fáze takto vzniklých kmitů je obecně různá, následkem toho vzniknou při rozjezdu a zastavení odchylky od přímky. V ustáleném stavu servomechanismy sledují žádanou trajektorii zcela přesně.

Na obr. č. 4 je zobrazena velmi krátká dráha (0,5 mm) projetá velmi vysokou konstantní rychlostí (120 m/min) pod úhlem 45° a při polohovém zesílení $K_v = 30 \left[\frac{1}{s} \right]$. Model byl sestaven tak, že propustné pásmo rychlostní smyčky osy x bylo 120 Hz a osy y 60 Hz. Tento velký rozdíl byl zvolen pro zdůraznění chyb při rozjezdu a zastavení.



Obr. č. 4 – Dynamické chyby lineární interpolace (skok žádané rychlosti)

Dynamické chyby se běžně kompenzují pomocí řídicích signálů rychlosti a zrychlení (dopředná vazba, feedforward). Pozornost zaslouží fakt, že feedforward rychlosti, který např.

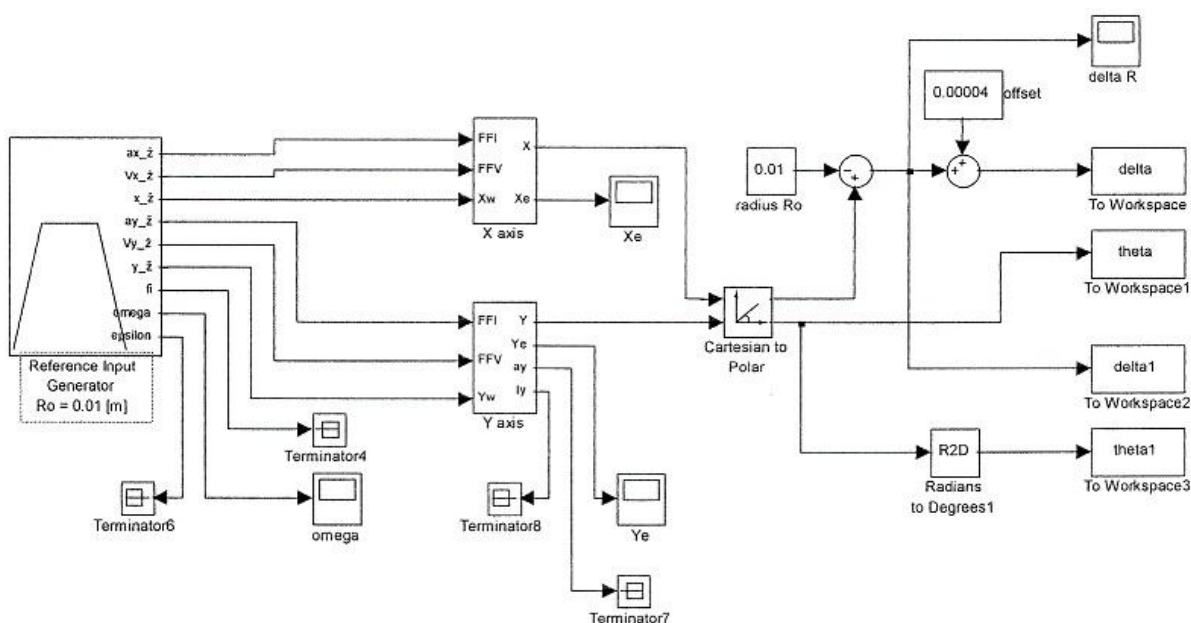
velmi účinně kompenzuje chyby poloměru při kruhové interpolaci, chybu při lineární interpolaci zvětší. Příčinou je nejspíše zvětšení skutečného zrychlení pohonu.

3.2. Chyby při kruhové interpolaci

Pro rozbor chování při kruhové interpolaci dráhy jsme použili schéma dle obr. č. 5. Blok „Reference Input Generator“ vytváří průběhy signálů žádané polohy, rychlosti a zrychlení pro osy x a y . Bloky „X axis“ a „Y axis“ jsou modely posuvových souřadnic, jejichž výstupy jsou převedeny do polárních souřadnic a vyhodnoceny v souřadnicích „delta“ (odchylka poloměru) a „theta“ (úhel na interpolované kružnici).

Při kruhové interpolaci vznikají z pravidla tyto chyby:

- 1) Vlivem dynamiky polohového servomechanismu
- 2) Vlivem nesterjných polohových zesílení interpolujících servomechanismů
- 3) Vlivem nesterjné dynamiky interpolujících servomechanismů
- 4) Chyby při přechodu kvadrantů vlivem pasivních odporů



Obr. č. 5 - Model pro rozbor chyb kruhové interpolace

3.3. Chyby poloměru při kruhové interpolaci

Chyba ad1 má původ v tom, že servomechanismy při kruhové interpolaci vykonávají harmonický pohyb. Protože polohový servomechanismus má poměrně malé propustné pásmo (nejvyšší frekvence harmonického pohybu, při které amplituda pohybu neklesne pod cca 71% žádané hodnoty), které se pohybuje v rozmezí cca 5 ÷ 35 Hz, při vyšších objížděcích rychlostech dochází ke známému zmenšování poloměru. Chyba je největší při malých poloměrech a lze ji vyjádřit vztahem:

$$\Delta r_0 = r_0 \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{K_V}\right)^2 + 1}} - 1 \right]$$

Δr_0 [m] změna poloměru interpolované křivky

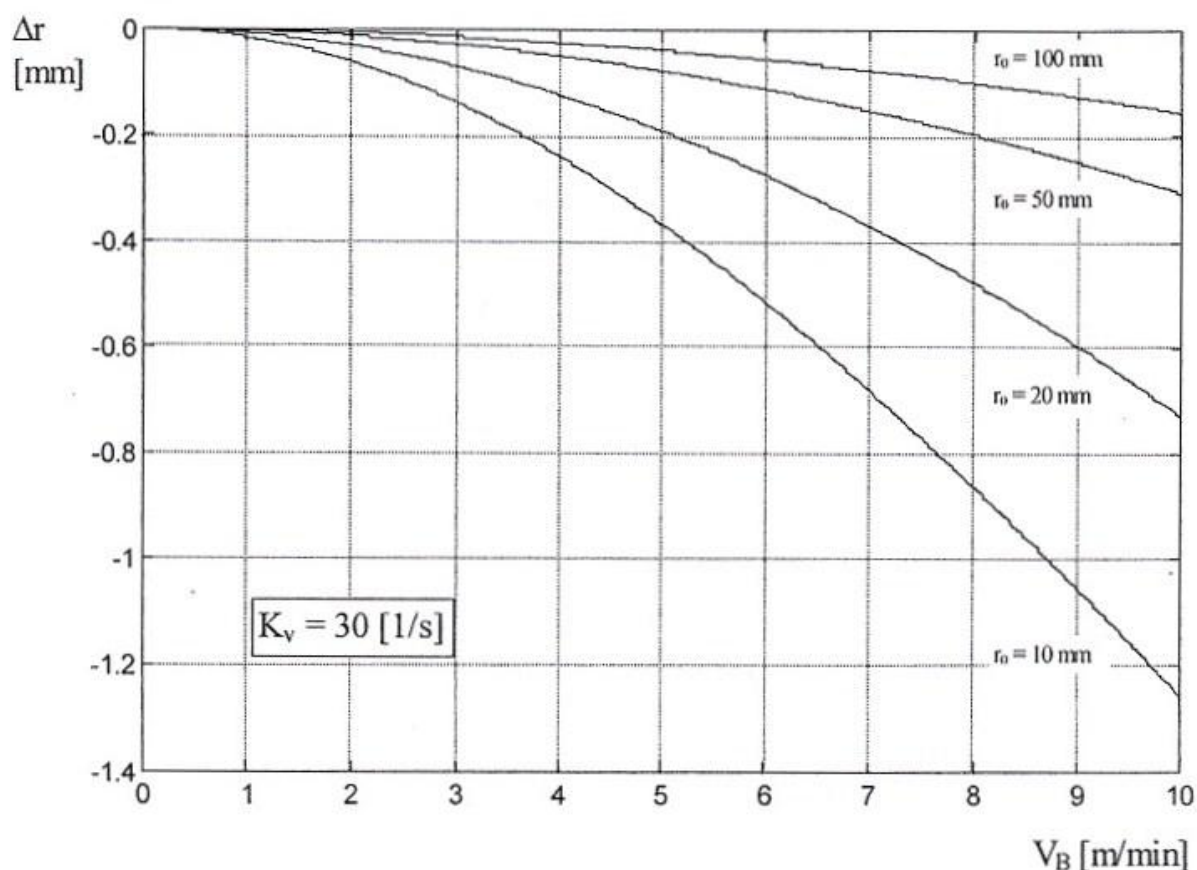
r_0 [m] poloměr interpolované křivky

ω [rad/s] úhlová rychlost objíždění poloměru r_0

K_V [1/s] zesílení polohové smyčky

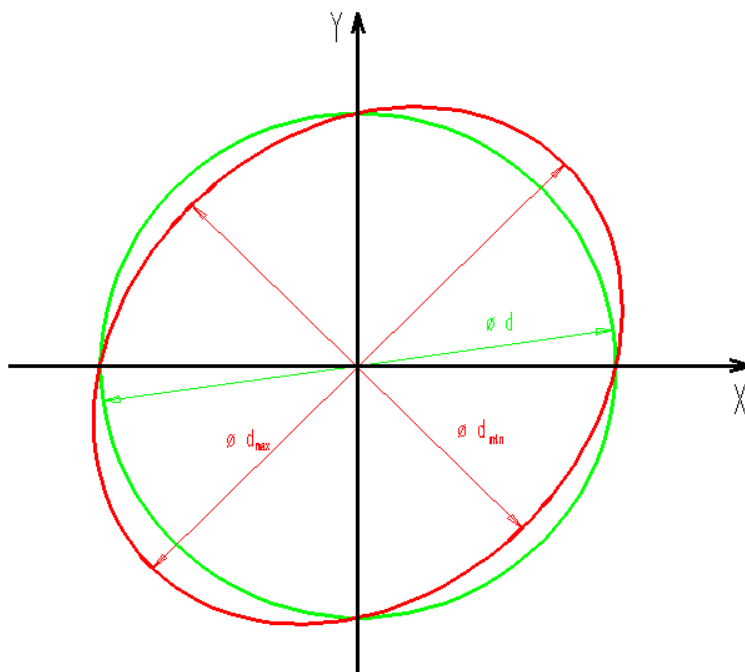
$v_B = \omega \cdot R$ [m/s] rychlost objíždění poloměru r_0

Závislosti změny poloměru Δr_0 na posuvové (objížděcí) rychlosti v_B a na poloměru kružnice r_0 jsou na obr. č. 6. Je zřejmé, že při rychlostech do 1 m/min tyto chyby nejsou (zejména pro menší poloměry) nezajímavé. Při posuvech kolem 5 m/min již jde o desetinové chyby, které narostou při 10 m/min až na hodnoty blízké milimetru. Tyto chyby kompenzují dopředné signály tzv. *feedforwardy*.



Obr. č. 6 - Dynamické chyby kruhové interpolace (chyby poloměru)

Chyby Δr by v praxi neměla vůbec přicházet v úvahu, protože nastavení stejných polohových zesílení K_V ve všech interpolujících osách patří ke zcela elementárním zásadám při seřizování pohonů CNC obráběcích strojů. Pokud dojde k různému nastavení K_V , interpolující souřadnice budou mít rozdílné frekvenční charakteristiky. Při kruhové interpolaci je pohonu zadávána žádaná poloha jako funkce $\sin(\omega t)$ resp. $\cos(\omega t)$. Skutečná poloha sleduje tuto harmonickou funkci se zkreslením odpovídajícím frekvenční charakteristice příslušné souřadnice. Budou-li frekvenční charakteristiky spolupracujících pohonů různé, skutečný poloměr kružnice se bude periodicky měnit a místo kružnice vznikne elipsa. Na obr. č. 7 je případ kdy $K_{VX} < K_{VY}$.



Obr. č. 7 - Chyba interpolované kružnice

Výsledná trajektorie pro $K_{vX} < K_{vY}$ (elipsa)

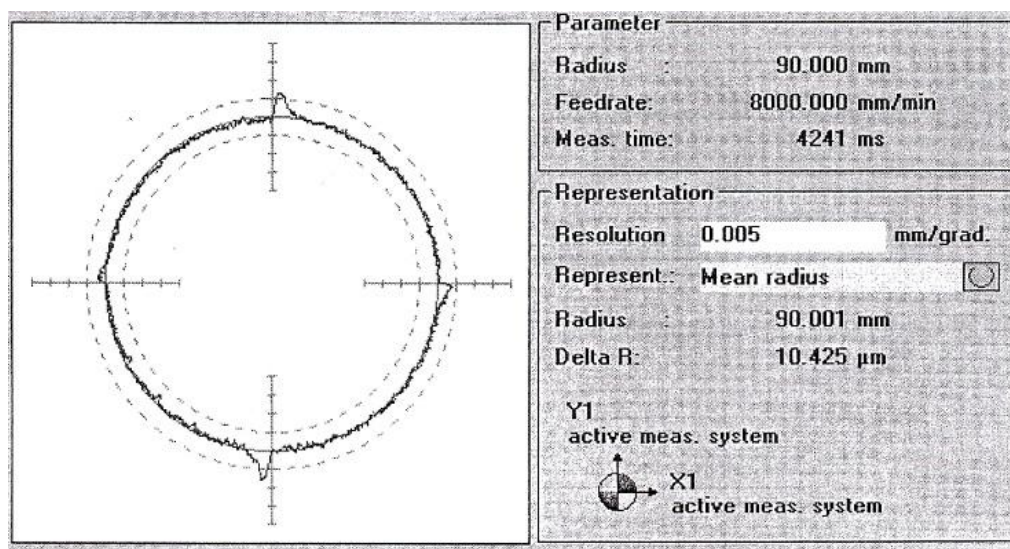
Výsledná trajektorie pro $K_{vX} = K_{vY}$ (kružnice)

Chyba $ad3$ vzniká také vlivem nestejné dynamiky spolupracujících souřadnic. V tomto případě ale jde o dynamiku rychlostních smyček. Jak již bylo zmíněno, při kruhové interpolaci je pohonu zadávána žádaná poloha jako harmonická funkce. Skutečná poloha sleduje tuto harmonickou funkci se zkreslením odpovídajícím frekvenční charakteristice příslušné souřadnice. Protože frekvenční charakteristiky spolupracujících souřadnic obráběcího stroje jsou obecně různé, poloměr interpolované kružnice se periodicky mění a místo kružnice vzniká elipsa, podobně jako v případě 2. Vzniklá chyba je řádově menší než v případě 2 a lze ji snadno zmenšit použitím feedforwardů.

3.4. Kvadrantové chyby při kruhové interpolaci

Při vytváření kruhové dráhy je pohyb interpolujících souřadnic dán harmonickými funkcemi. Při průchodu kvadranty jedna ze souřadnic mění smysl pohybu, a protože v mechanice posuvů téměř vždy působí třecí síly Coulombského charakteru, musí proudový regulátor změnit proud motorem z hodnoty $\frac{F_t}{K_m}$ na $\frac{-F_t}{K_m}$ (F_t [N] – třecí síla, K_m $\left[\frac{N}{A}\right]$ – konstanta

motoru). Tato změna neproběhne skokem a než proud dosáhne hodnotu, při které se servomechanismus začne pohybovat opačným směrem, uplyne určitý čas (cca $1 \div 3$ m/s). Během této doby souřadnice která mění smysl pohybu stojí, zatímco se druhá osa pohybuje maximální rychlostí. Poloměr skutečné dráhy se proto zvětší → vznikne kvadrantová chyba. Jiná interpretace kvadrantové chyby je, že pohon reaguje na skok třecí síly – kvadrantová chyba je průběh odchylky při skokovém zatížení → rázová dynamická tuhost. Typický příklad naměřené kvadrantové chyby je na obr. č. 8.



Obr. č. 8 - Příklad měření chyb kruhovitosti

3.4.1. Kompenzace kvadrantových chyb

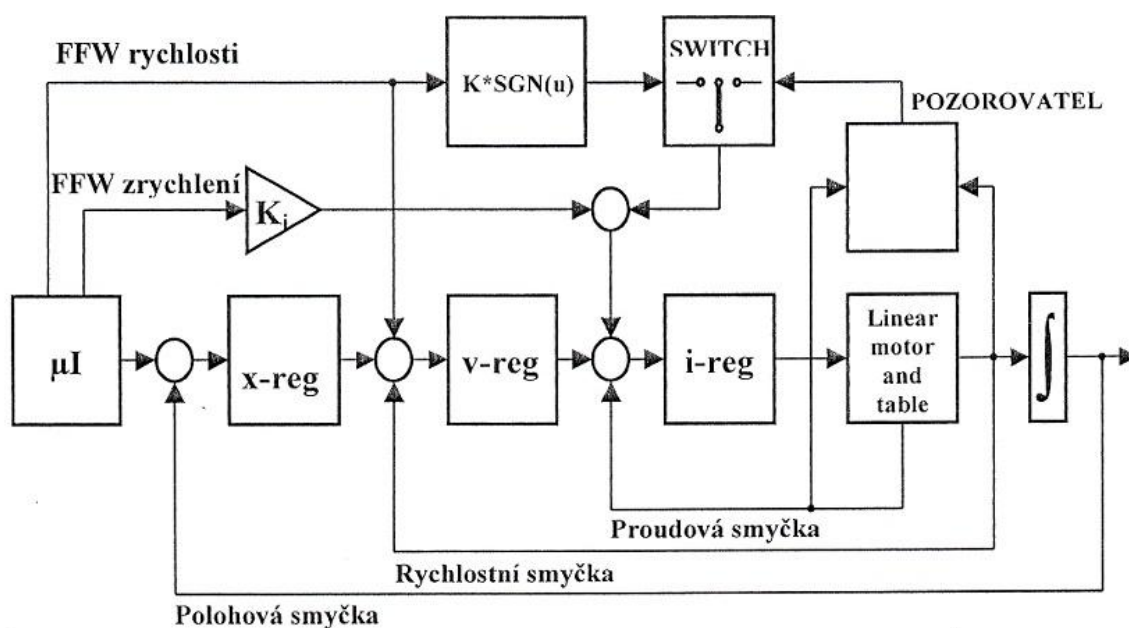
Jeden z nejužívanějších principů kompenzace kvadrantových chyb spočívá v přivedení pomocného signálu na vstup proudového, nebo rychlostního regulátoru. Pomocný signál urychlí změnu smyslu proudu motorem, následkem toho se zkracuje čas, po který se reverzující osa nepohybuje a tak dojde ke zmenšení kvadrantové chyby. Na obr. č. 9 jsou znázorněny dva způsoby kompenzace. V pohonu se samozřejmě používá jen jedna z nich. Typy kompenzace kvadrantových chyb:

- 1) Konstantní kompenzace na vstupu proudového regulátoru: jedná se o nejjednodušší formu kompenzace z hlediska simulace. Pomocný signál je odvozen od dopředného signálu rychlosti.
- 2) Konstantní kompenzace na vstupu rychlostního regulátoru: jedná se o poněkud složitější formu kompenzace. Při změně smyslu žádaného pohybu je na vstup rychlostního regulátoru přiveden pomocný impuls. Při správném nastavení tento

impuls rychle změni výstup rychlostního regulátoru. Tím zajistí rychlou změnu polarity výstupu proudového regulátoru.

Nevýhodou výše uvedených způsobů kompenzací kvadrantových chyb je ta, že výpočtem nelze zcela přesně stanovit třecí síly a pomocné signály je nutno nastavit metodou zkusmo přímo na stroji.

Kompenzace s využitím pozorovatele: je další možností kompenzace kvadrantových chyb. Nejedná se ovšem o konstantní typ kompenzace, jako u výše zmíněných metod. Pozorovatel díky hodnotám rychlosti a proudu stanoví velikost vnější zatěžující síly. Hodnota pozorované vnější síly obsahuje i síly třecí a může tedy sloužit jako kompenzační signál. Nevýhodou této metody může být velký vliv seřízení pozorovatele a problematické zpracování signálů s velkým podílem šumu. Naopak výhodou metody je nezávislost kompenzace na velikosti pasivních odporů.



Obr. č. 9 - Schéma kompenzace dynamických chyb servomechanismu

4. Rozbor současné techniky pohonů

4.1 YASKAWA



Obr. č. 10 - Regulátor a silová elektronika pohonu Sigma II

Všeobecná charakteristika výrobního programu

Servopohony od firmy YASKAWA se vyznačují vynikajícími dynamickými vlastnostmi, vysokou přesností, snadným nastavením parametrů, malými rozměry (viz. příloha č. 1). Sériově se dodává připojený snímač polohy. Výrobky této firmy vyhovují normě ISO 9001, JQA.

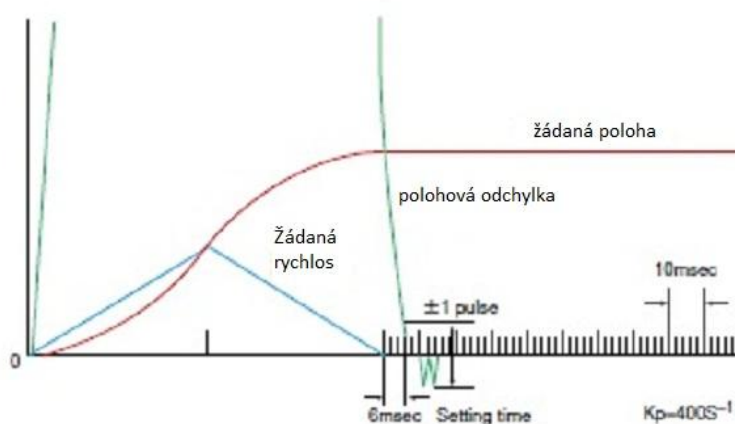
Společnost YASKAWA vyrábí servopohony pro pohon posuvů a pohon včetně obráběcích CNC strojů. Dále k těmto motorům dodává řídicí jednotky, které zajišťují napájení a ochranu motoru. Všechny motory pohonů jsou dodávány v široké škále modifikací s příslušenstvím (provedení konce hřídelů, typ konektoru, typ brzdy, atd.).

Druhy pohonů

Firma YASKAWA nabízí poměrně velkou řadu pohonů (Junma, Sigma II, special Sigma II, Sigma III, Sigma V). Za zmínku stojí dva z této škály pohonů:

4.1.1. YASKAWA SIGMA II

Řada SIGMA II je velice rozšířený typ servopohonu. Jedná se o pohony s rychlou odezvou, vysokou rychlostí (viz. obr. č. 11) a přesností. Frekvence propustného pásma rychlostní smyčky tohoto pohonu činí u samotného motoru **400 Hz**.



Obr. č. 11 – příklad nastavení polohy servopohonu SIGMA II

Servomotory pro pohon posuvů

Jsou pohony osazeny plně digitálními synchronními, střídavými motory s kotvou s permanentními magnety. Tyto motory se dodávají v širokém spektru výkonů (30W ÷ 15kW). Rozsah točivých momentů je široký a tím zároveň vhodný pro široké pole využití. Dolní hranice momentu je udávána již od 2,8Nm a horní hranice až k hodnotě 28,4 Nm. Dolní hodnota maximálních otáček motoru začíná již na $1500 \left[\frac{\text{ot}}{\text{min}} \right]$ a horní hodnota končí u hodnoty $6000 \left[\frac{\text{ot}}{\text{min}} \right]$.

Vhodné použití těchto pohonů je u souřadnicových stolů, posuvů obráběcích strojů a výrobních linek.

Označení motorů

SGMPH - 01 A 1 A 2 S D

SGMPH – označení modelové řady (SGMPH, SGMAH, SGMUH, SGMSH, **SGMGH**)

01 – výkon motoru

A – typ napájení

1 – sériová specifikace

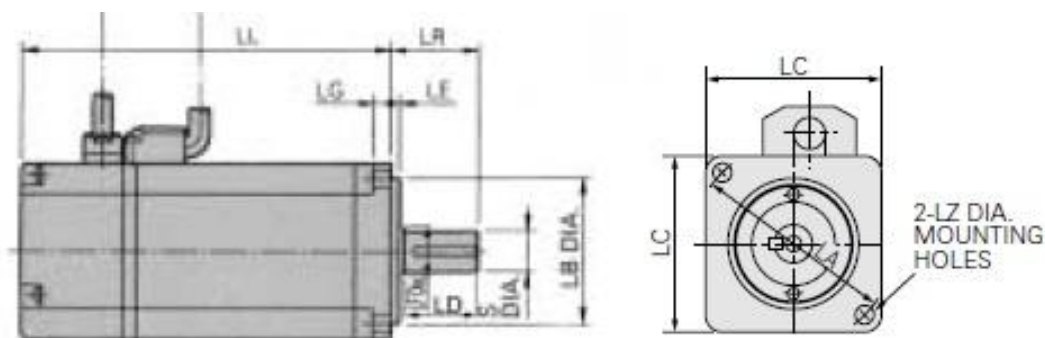
A – typ designu

2 – tvar výstupní hřídele

S – specifikace brzdy a těsnění

D – typ konektoru

Rozměry motoru

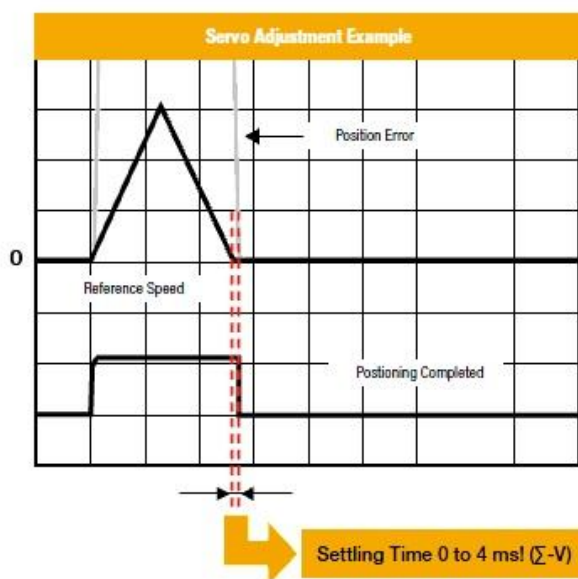


Obr. č. 12 – rozměrový výkres motoru pro pohon SIGMA II

4.1.2. YASKAWA SIGMA V

Jedná se o nejnovější model servopohonu firmy YASKAWA, který je následníkem servopohonu SIGMA II. Frekvence propustného pásma rychlostní smyčky je rovna **1,6 kHz**. Přesnost nastavení polohy pohonu výrobce uvádí do 10nm. Mezi nespočet funkcí patří tzv. „*autotuning*“ pro automatické seřízení regulátorů pohonu. Díky vynikající dynamice byla snížena doba ustálení polohy po poklesu žádané rychlosti na nulu na $4 \div 0$ ms – viz. obr. č. 13.

K pohonu je dodávána celá řada rotačních i lineárních motorů. Rotační motory jsou nabízeny v rozsahu 0,1 kW ÷ 15kW. Stavba motorů, jejich rozměry, výkon a označení naprosto koresponduje s motory určené pro SIGMA II.



Obr. č. 13 – graf doby ustálení pohonu SIGMA V

4.2. KOLLMORGEN – AKD



Obr. č. 14 – Regulátor a silová elektronika pohonu řady AKD od firmy KOLLMORGEN

Druhy pohonů

Firma KOLLMORGEN dodává na trh velkou nabídku pohonů (S200, S300 ... S700, AKD). Za naší pozornost stojí pohony řady AKD.

AKD

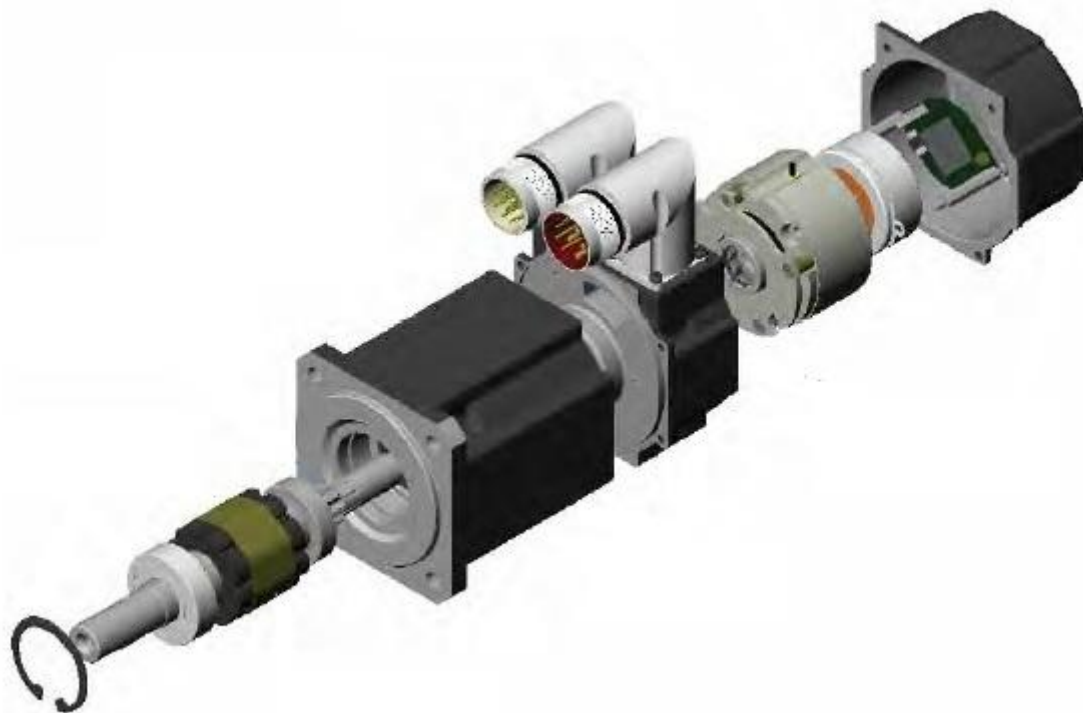
Řada AKD je souborem pohonů s rychlou odezvou, přesností. Frekvence propustného pásma rychlostní smyčky (samotný motor) těchto pohonů činí **1,6 kHz**, proudové smyčky 5 kHz a polohové smyčky 0,8 kHz. Rozlišení zpětné vazby je až do 27 - bit. Aktualizace v proudové smyčce je 0,67 μ s. Pohony mohou být osazeny jak lineárními tak rotačními motory. Možnost kombinací sahá až k počtu 50. tisíc. Vhodné použití těchto pohonů je u souřadnicových stolů a posuvů obráběcích strojů.

Servomotory pro pohon posuvů (AKM)

Tyto motory se dodávají v širokém spektru výkonů (2000W ÷ 15kW). Možnost rozsahu točivých momentů je velký a tím zároveň vhodný pro široké pole využití. Dolní hranice momentu je udávána již od 0,18 Nm a horní hranice až k hodnotě 52,3 Nm. Dolní hodnota maximálních otáček motoru začíná již na 1000 $\left[\frac{\text{ot}}{\text{min}}\right]$ a horní hodnota končí u hodnoty 8000 $\left[\frac{\text{ot}}{\text{min}}\right]$.

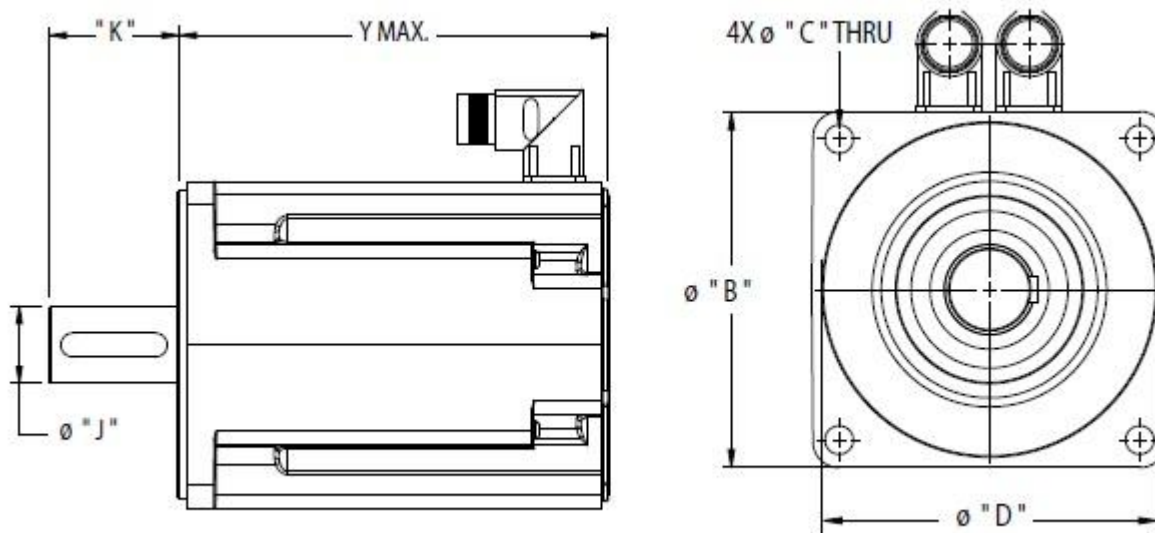
Základní typy motorů

Motory se rozdělují do tří základních řad: AKM 1, AKM 2 – 3, AKM 4 – 7. Největším výkonem disponují motory AKM 5 – 7 (nevýhodou těchto motorů je „velký“ rozměr. viz. příloha č. 2).



Obr. č. 15 – motor pro pohony řady AKD

Rozměry motoru



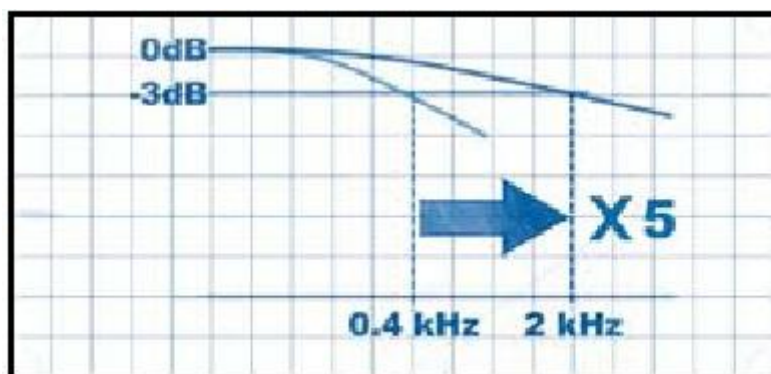
Obr. č. 16 – rozměrový výkres motoru pro pohon AKD

4.3. OMRON – ACCURAX G5



Obr. č. 17 – Regulátor a silová elektronika pohonu ACCURAX G5 od firmy OMRON

Firma OMRON dodává kompletní automatizační systémy. Jednou z jeho řady výrobků jsou i servopohony. Za zmínku stojí ACCURAX G5. Frekvence propustného pásma rychlostní smyčky činí **2 kHz** (viz obr. č. 18). Doba ustálení polohy po poklesu rychlosti $2 \div 0$ ms. Pohony ACCURAX se zpravidla osazují rotačními motory.



Obr. č. 18 – propustné pásmo rychlostní smyčky pohonu ACCURAX G5

Servomotory pro pohon posuvů

Motory firmy Omron pro pohony ACCURAX G5 jsou nabízeny ve 3 typech, dvou voltážích o různých výkonech. Celá nabídka činí pouze 7 motorů s různými specifikacemi. Rozmezí výkonů motorů činí od 50 do 3000 W, dolní hranice momentu je 0,16 Nm a horní hranice dosahuje 28,7 Nm. Dolní hodnota maximálních otáček motoru začíná již na $1000 \left[\frac{\text{ot}}{\text{min}} \right]$ a horní hodnota končí u hodnoty $3000 \left[\frac{\text{ot}}{\text{min}} \right]$.

Označení motorů

R88M-K05030H-BOS2

R88M-K – označení modelové řady pro pohon ACCURAX G5

050 – výkon

30 – jmenovité otáčky

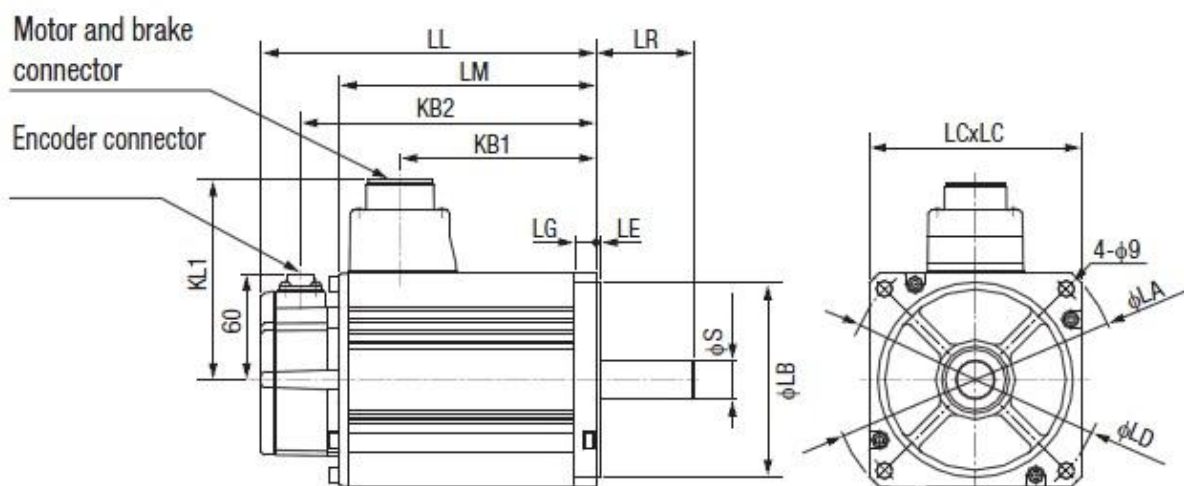
H – napětí, typ senzoru polohy

B – typ brzdy

O – specifikace mazání

S2 – zakončení hřídele

Rozměry motoru



Obr. č. 19 – rozměrový výkres motoru pro pohon ACCURAX G5

5. Regulace pohonu

5.1. Proudová smyčka

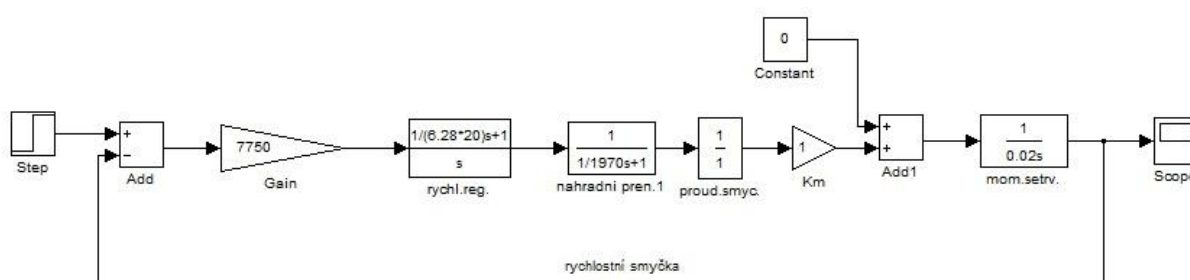
Zavedením proudové zpětné vazby dochází ke zlepšení dynamiky motoru. Je to nejpodřízenější zpětná vazba polohového servopohonu a zařazuje se s cílem rychlého a přesného řízení proudu (tzn. i momentu) a potlačení vlivu nelinearit měniče.

V praxi se proudová smyčka nejčastěji sestává z proudového proporcionálně-integračního (PI) regulátoru a měniče v přímé větvi. Měnič má v praxi za úkol na základě signálu přicházejícího z proudového regulátoru vygenerovat potřebné napětí na vstupu motoru. Dynamiku měniče lze nahradit dopravním zpožděním, jehož velikost závisí na spínacích kmitočtech, které se u různých výrobců pohybují v oblasti $2 \div 4$ kHz, v některých případech až 100 kHz.

Pro zjednodušení celého modelu pohonu jsme proudovou zpětnou vazbu nezavedli z důvodu: f_{0i} je desetinásobek f_0 , takže dynamika proudové smyčky rychlostní smyčku prakticky neovlivňuje (viz. lit. č. [9]).

5.2. Rychlostní smyčka

Řídicím signálem rychlostní smyčky je žádaná hodnota rychlosti vstupující z polohové smyčky. Úkolem rychlostní smyčky je co nejpresněji sledování žádané rychlosti a tedy zabezpečení minimální závislosti pohonu na vnějších vlivech.



Obr. č. 20 - blokové schéma rychlostní smyčky

Popis schématu:

Gain: zesílení rychlostního regulátoru K_P

rychlostní regulátor: přenos PI regulátoru $\left(\frac{T_n \cdot s + 1}{s}\right)$. T_n – časová konstanta přenosu regulátoru

proudová smyčka: dynamika proudové smyčky je zanedbána (přenos je roven jedné)

K_m – konstanta motoru [Nm/A]

moment setrvačnosti: zahrnuje všechny hmoty servomechanismu redukované na motor $\left(\frac{1}{J \cdot s}\right)$

Step, Step 1: skok žádané rychlosti; skok vnějšího zatěžujícího momentu (při simulaci se používá jeden, nebo druhý)

Pozn.:

Náhradní přenos:

Klasický model motoru umožňuje nastavit nereálně vysokou dynamiku rychlostní smyčky neodpovídající výsledku měření. Proto byl k motoru připojen náhradní přenos zhoršující dynamiku motoru.

Náhradní přenos byl pro jednoduchost zvolen jako časová konstanta. Ve skutečnosti se jedná o několik kmitavých členů 2. řádu (vyplynulo by z analýzy mechaniky motoru metodou konečných prvků).

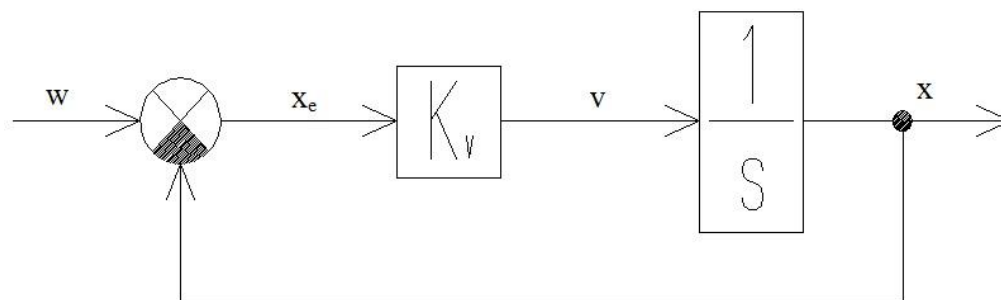
Dynamika náhradního přenosu byla zvolena metodou zkusmo tak, aby propustné pásmo rychlostní smyčky mělo požadovanou hodnotu při 30% překmitu odezvy na skok žádané rychlosti.

5.3. Polohová smyčka

Pokud bude dobře nastaven rychlostní i proudový regulátor, lze při maximálním zjednodušení považovat rychlostní smyčku za dokonalý proporcionální člen s jednotkovým přenosem mezi žádanou rychlostí v_z a skutečnou rychlostí v .

Polohová smyčka navazuje na smyčku rychlostní a po úpravě dostáváme schéma dle obr. č. 21.

Odvození



Obr. č. 21 - blokové schéma polohové smyčky-nejjednodušší model

Přenos polohové smyčky:

$$x = x_e K_V \frac{1}{s}$$

$$\underline{x_e = w - x}$$

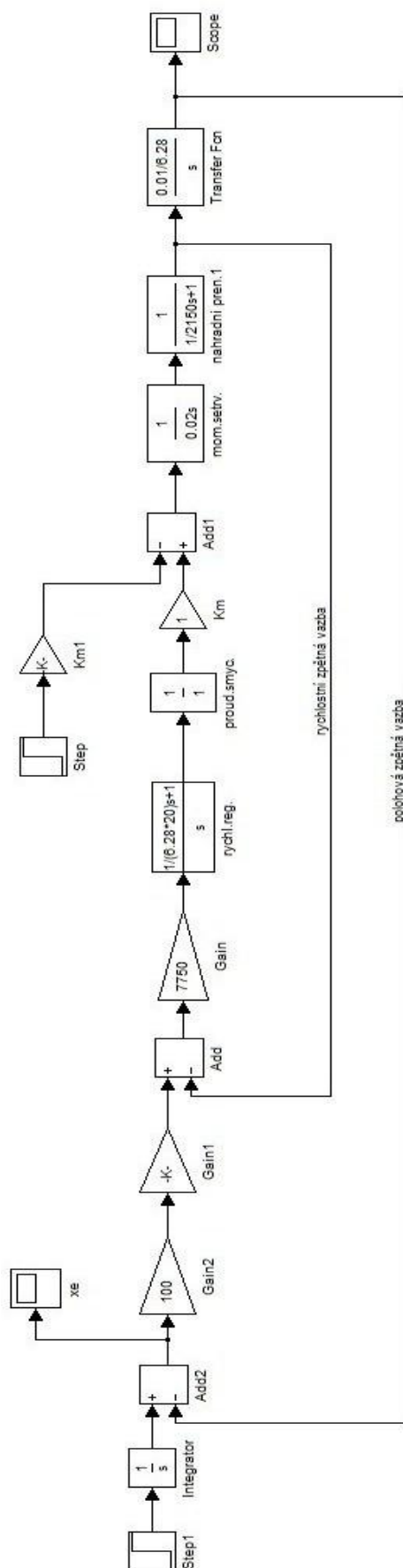
$$x = w \frac{K_V}{s} - x \frac{K_V}{s}$$

$$x \left(1 + \frac{K_V}{s} \right) = w \frac{K_V}{s}$$

$$\frac{x}{w} = \frac{\frac{K_V}{s}}{\frac{s + K_V}{s}} = \frac{K_V}{s + K_V} = \frac{1}{Ts + 1}$$

$$T = \frac{1}{K_V} ; \quad \boxed{\frac{x}{w} = \frac{1}{\frac{s}{K_V} + 1}}$$

Příklad běžně používaného modelu polohového servomechanismu je na obr. č. 22.



Obr. č. 22 - blokové schéma polohové smyčky

Popis schématu

Gain2: K_V – polohové zesílení

Gain1: $\frac{1}{K_C} = \frac{2\pi}{h_s}$ pro šroub o stoupání 10mm/ot: $\frac{2\pi}{0,01 \text{ m/ot}}$

Gain: zesílení rychlostního regulátoru

Rychl. regulátor: typu PI (proporcionálně – integrační)

Step: skoková zatěžující síla

Km1: $K_C = \frac{h_s}{2\pi}$

Km – konstanta motoru [Nm/A]:

Mom. setr.: celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru

Náhradní přen.: Náhradní přenos viz. rychlostní smyčka

Proud. smyč.: proudová smyčka - dynamika proudové smyčky je zanedbána (přenos je roven jedné)

6. Sestavení blokových schémat pohonu

6.1. MATLAB a Simulink

Pro simulaci a řízení servopohonu jsme použili program MATLAB s nadstavbou Simulink. Prostředí Simulink je využíváno k numerickému řešení diferenciálních rovnic a je v něm možno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic. Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru lze modely lineárních, nelineárních, v čase diskrétních nebo spojitých systémů navrhovat formou tzv. blokových diagramů, ve kterých jsou modely vytvářené pomocí myši řízených příkazů. Modelovaný systém je možné dále analyzovat pomocí příkazů a funkcí dostupnými z prostředí MATLAB (frekvenční charakteristiky, geometrická místa kořenů, ...).

6.2. Seřízení rychlostní smyčky (s náhradním přenosem)

Pro zjednodušení práce s modelem byl pohon nastavován v prostředí toolboxu pro geometrické místa kořenů (funkce RLTOOL). Jako soustava bylo použito schéma dle obr. č.

23. Regulátor (COMPENSATOR) měl dvě složky:

- vlastní PI regulátor s přenosem

$$K_n \frac{T_n s + 1}{s}$$

- náhradní přenos

$$\frac{1}{Ts + 1}$$

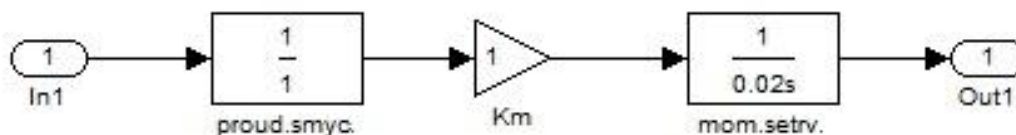
Časová konstanta PI regulátoru byla volena z hodnot $\frac{1}{2\pi \cdot 10}$ až $\frac{1}{2\pi \cdot 40}$. Časová konstanta náhradního přenosu byla zvolena zkusmo (např. pro propustné pásmo 400Hz $\frac{1}{2\pi \cdot 30}$) a v dalším byla upřesňována. Pro takto sestavený model bylo:

- 1) Zvyšováno zesílení rychlostního regulátoru tak, že byl dosažen přechodový děj s překmitem 30%. Pro toto nastavení bylo odečteno propustné pásmo.
- 2) Bylo-li f_0 menší než žádané, byla zmenšena časová konstanta náhradního přenosu T (při větším f_0 bylo T zvětšeno) a opakoval se bod 1.

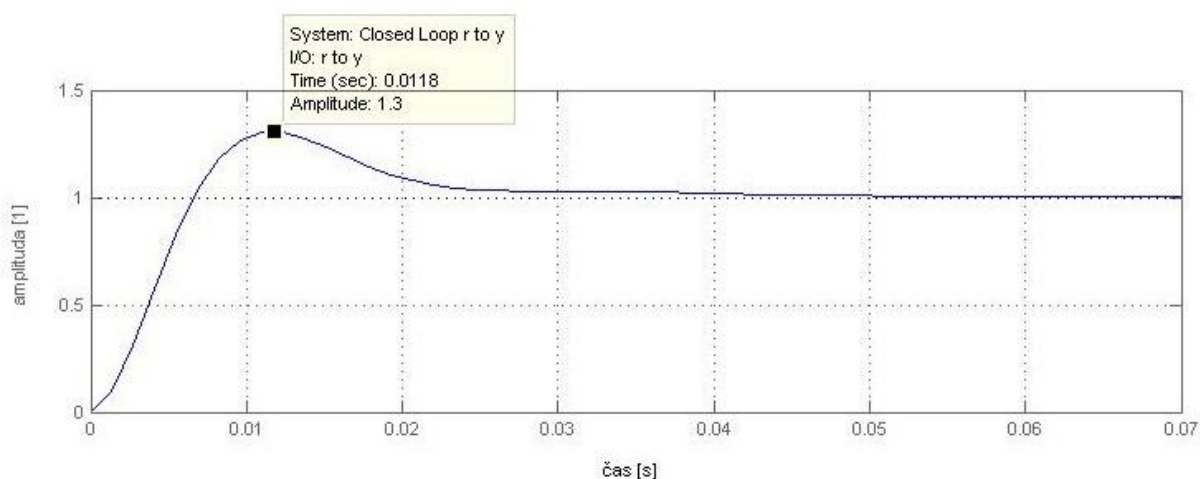
Po několika opakováních bodů 1) a 2) byl získán pohon s žádaným propustným pásmem a s přechodovým dějem (odezva na skok žádané rychlosti) s překmitem 30%.

Tímto postupem byly získány modely s propustným pásmem f_0 : 50; 100; 400; 800; 1600 Hz.

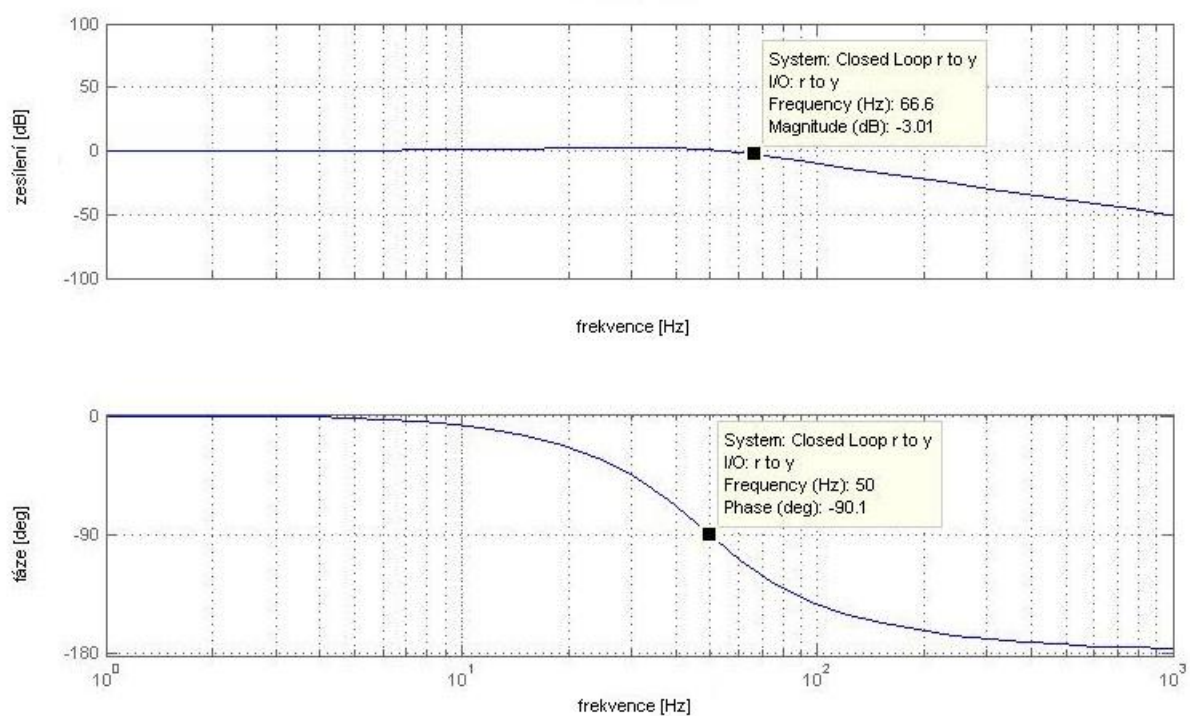
Pro kontrolu byl analogickým postupem získán model s dvoumotovým modelem motoru a $f_0=400$ Hz.



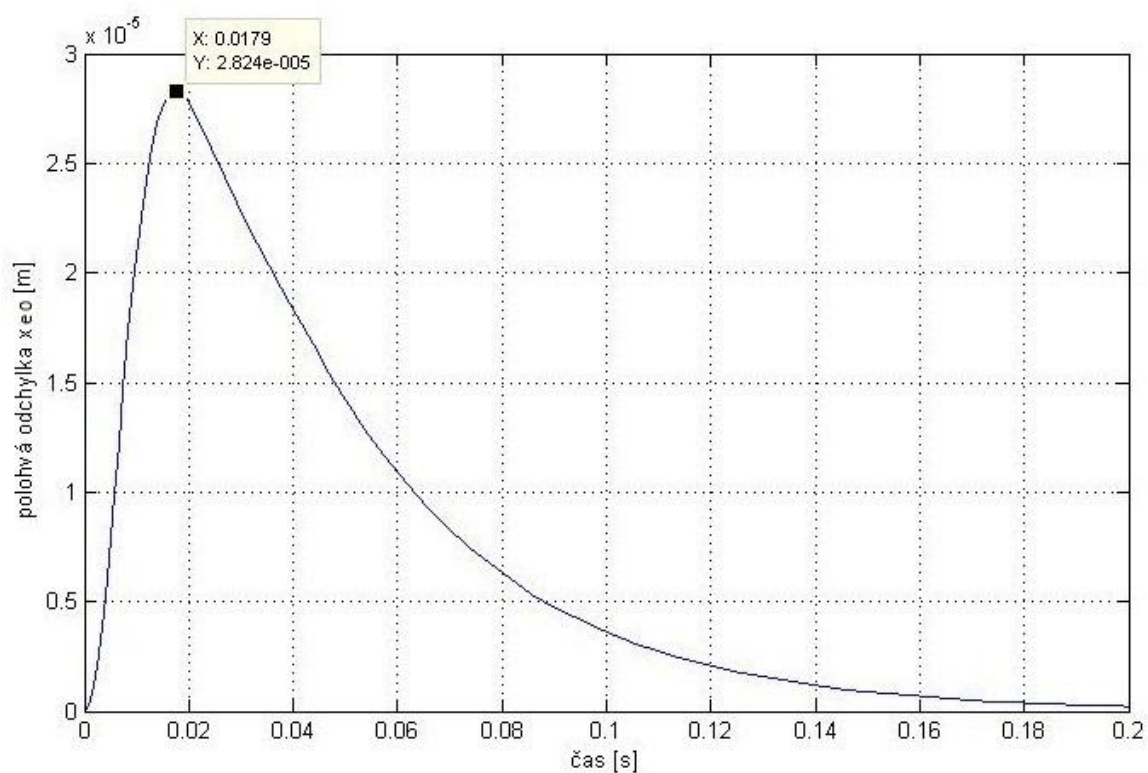
Obr. č. 23 – blokové schéma rychlostní smyčky pro seřízení GMK



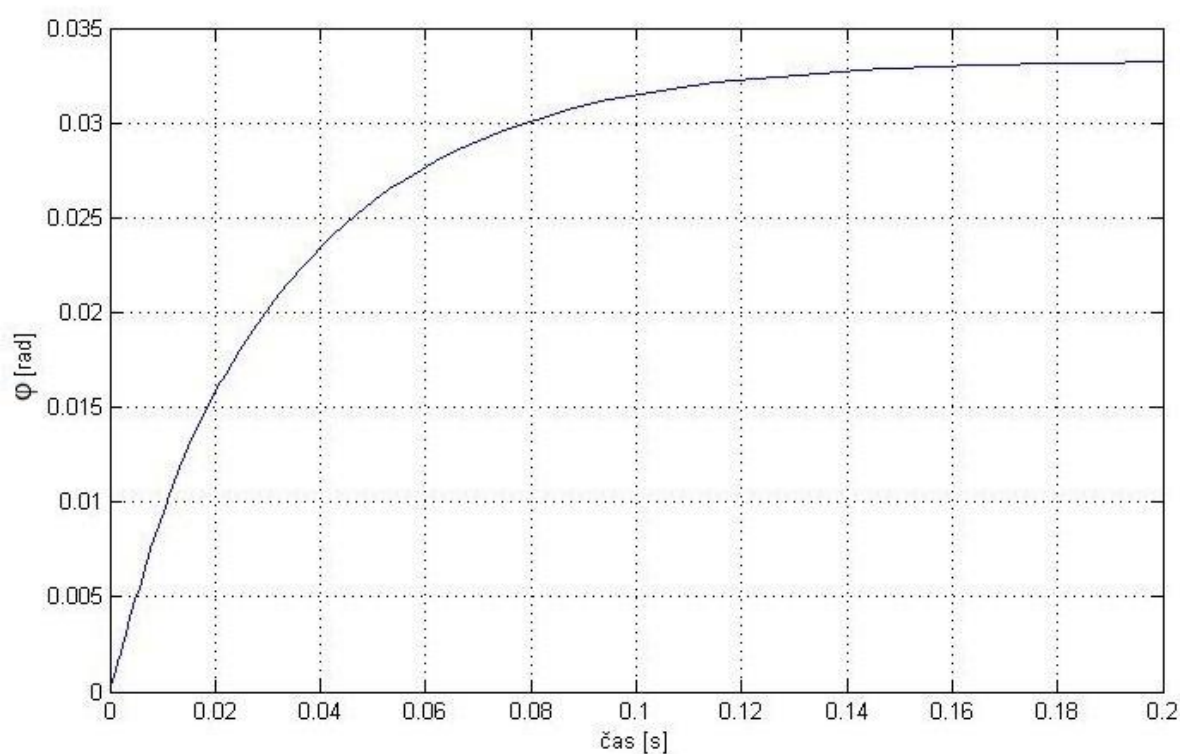
Obr. č. 24 – Přechodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 50\text{Hz}$



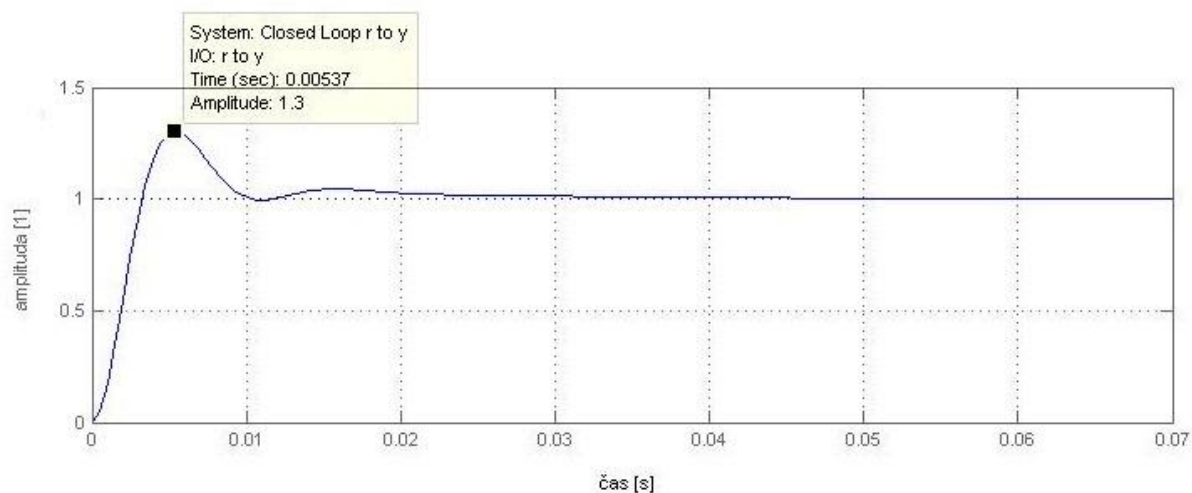
Obr. č. 25 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 50\text{Hz}$



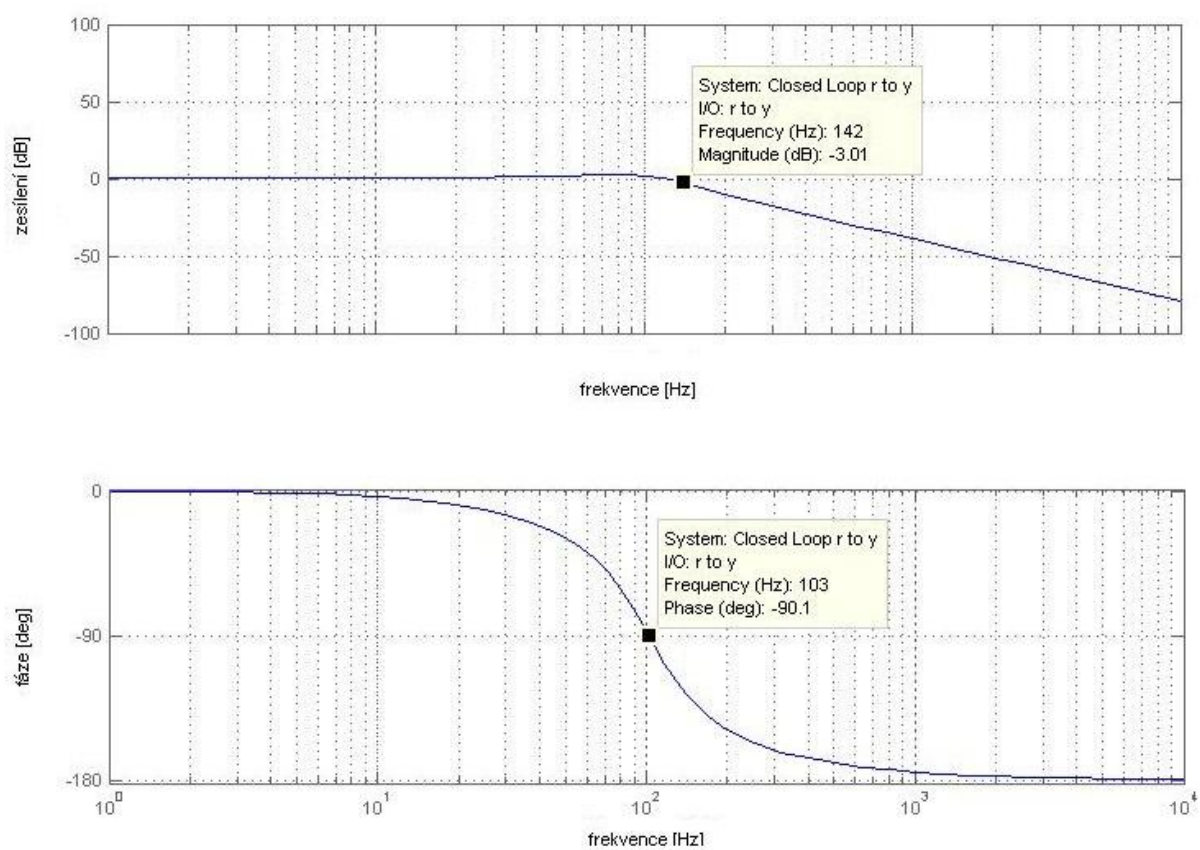
Obr. č. 26 – Polohová odchylka – odezva na skok síly $F_{ext} = 6000$ N ($f_0 = 50$ Hz)



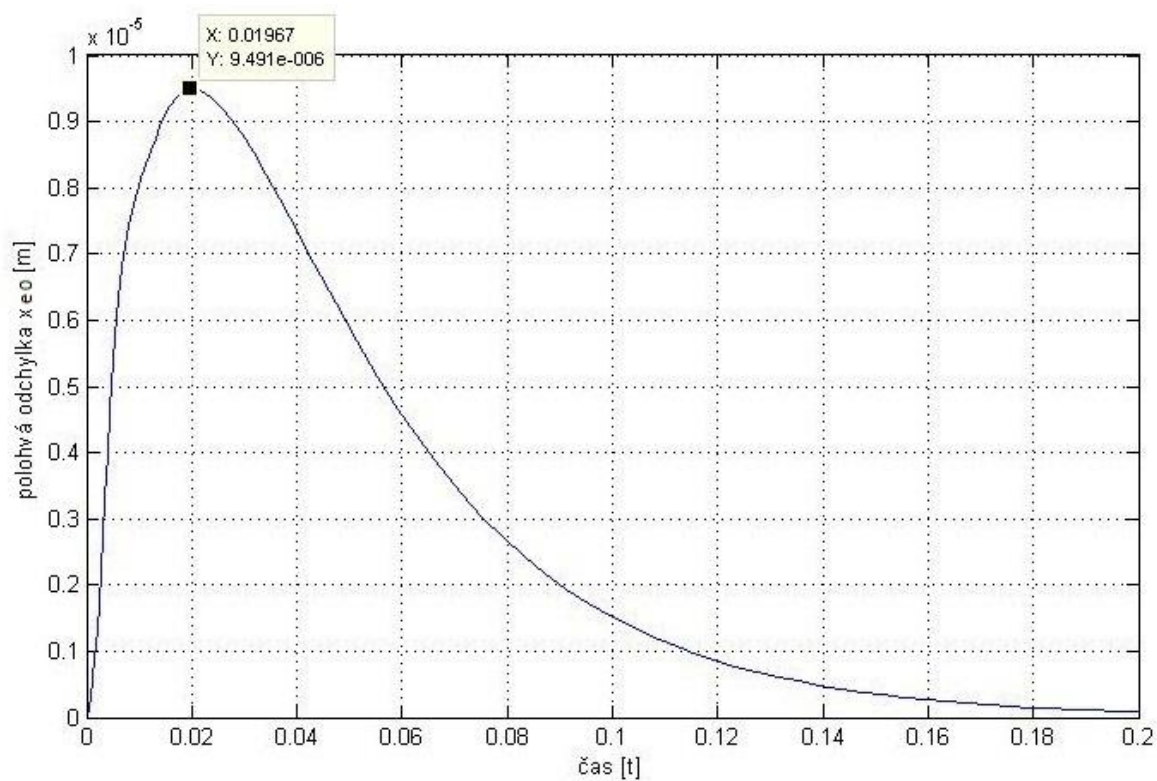
Obr. č. 27 – Polohová odchylka – odezva na skok žadané rychlosti ($f_0 = 50$ Hz)



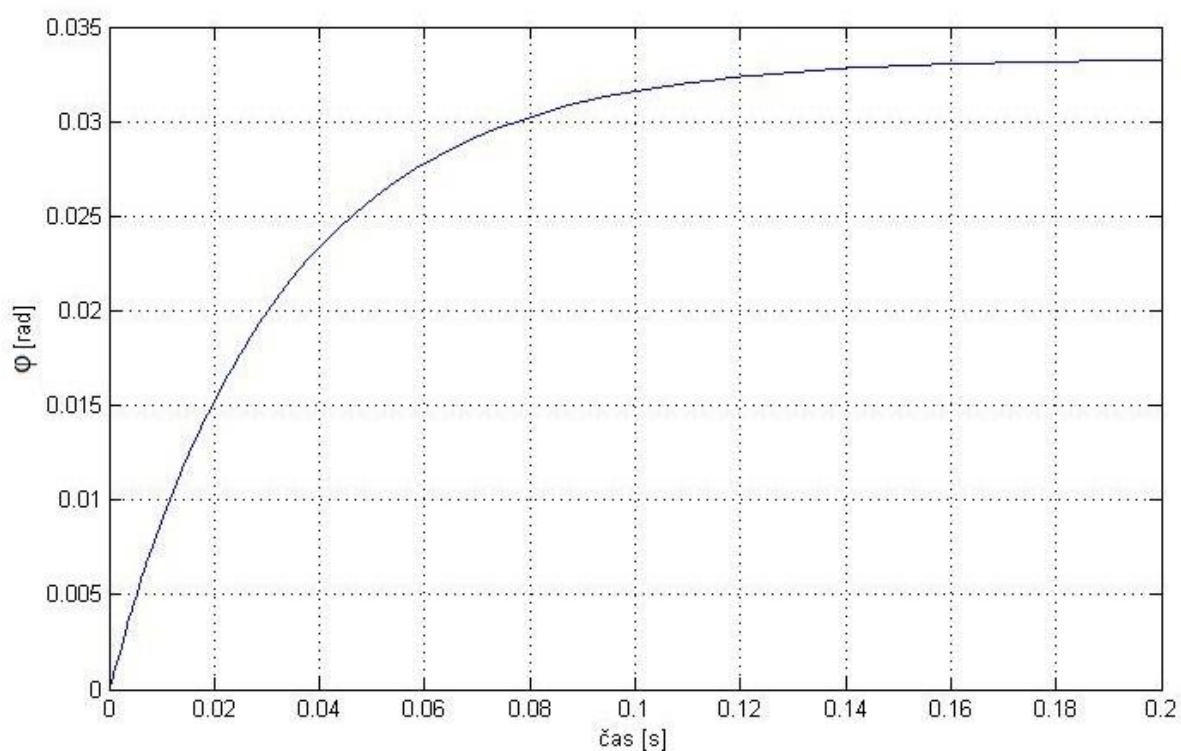
Obr. č. 28 – Přejchodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 100\text{Hz}$



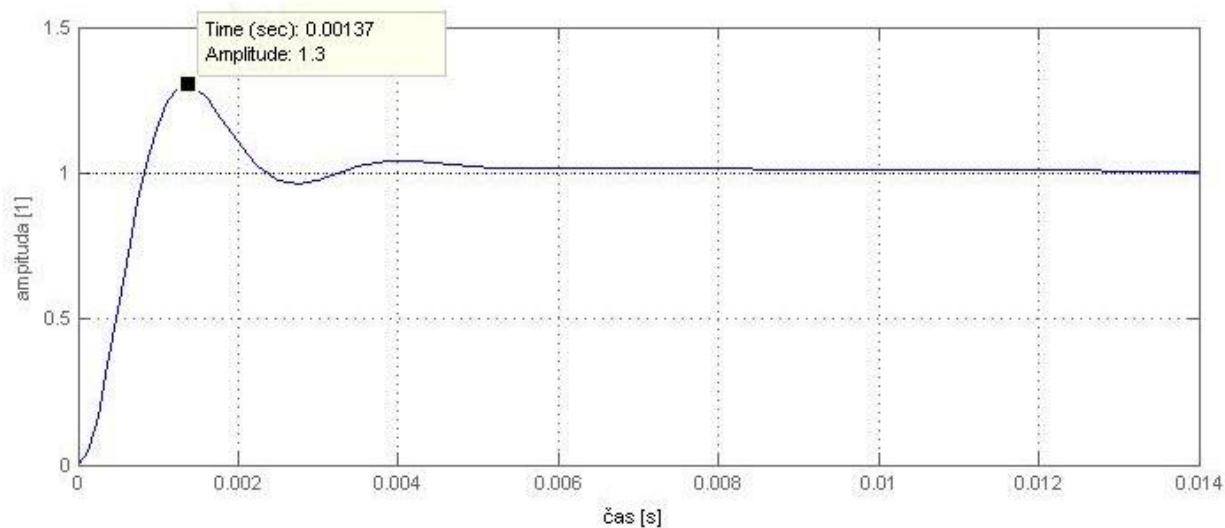
Obr. č. 29 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 100\text{Hz}$



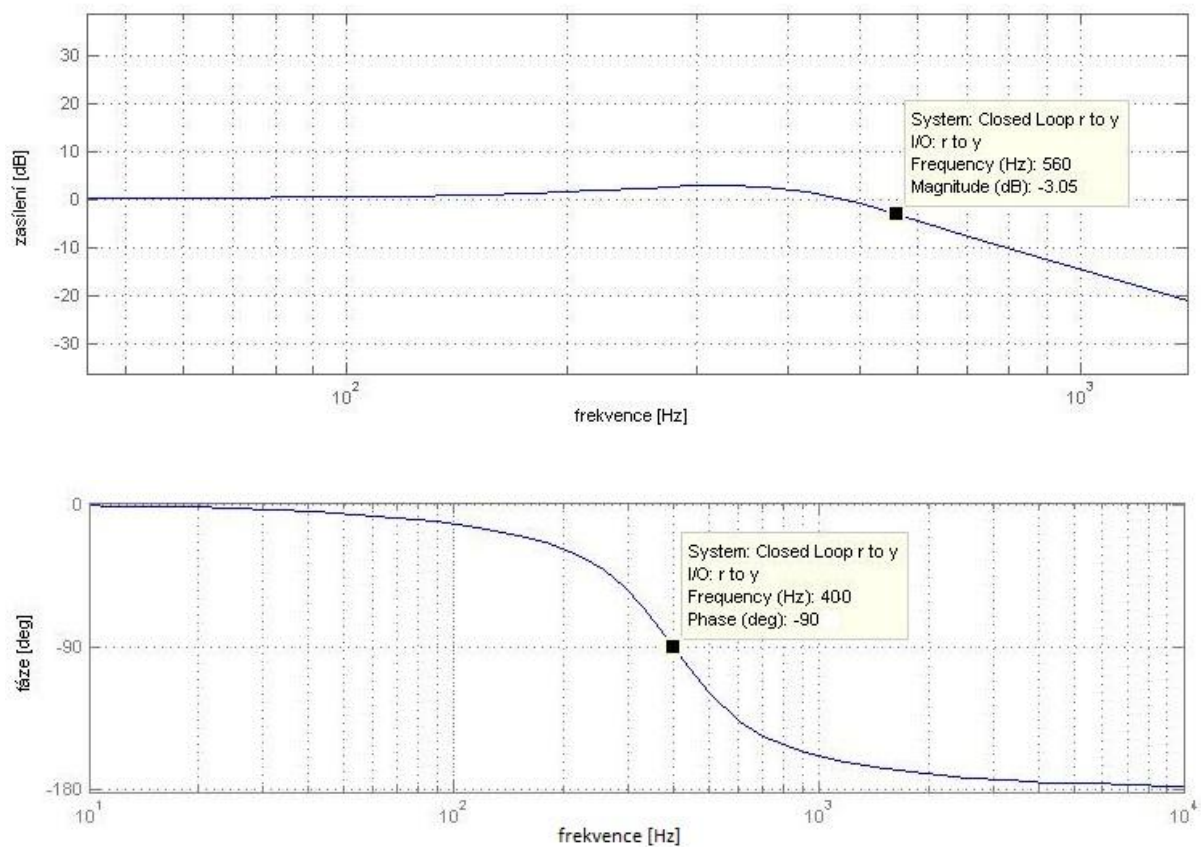
Obr. č. 30 – Polohová odchylka – odezva na skok síly $F_{ext} = 6000 \text{ N}$ ($f_0 = 100\text{Hz}$)



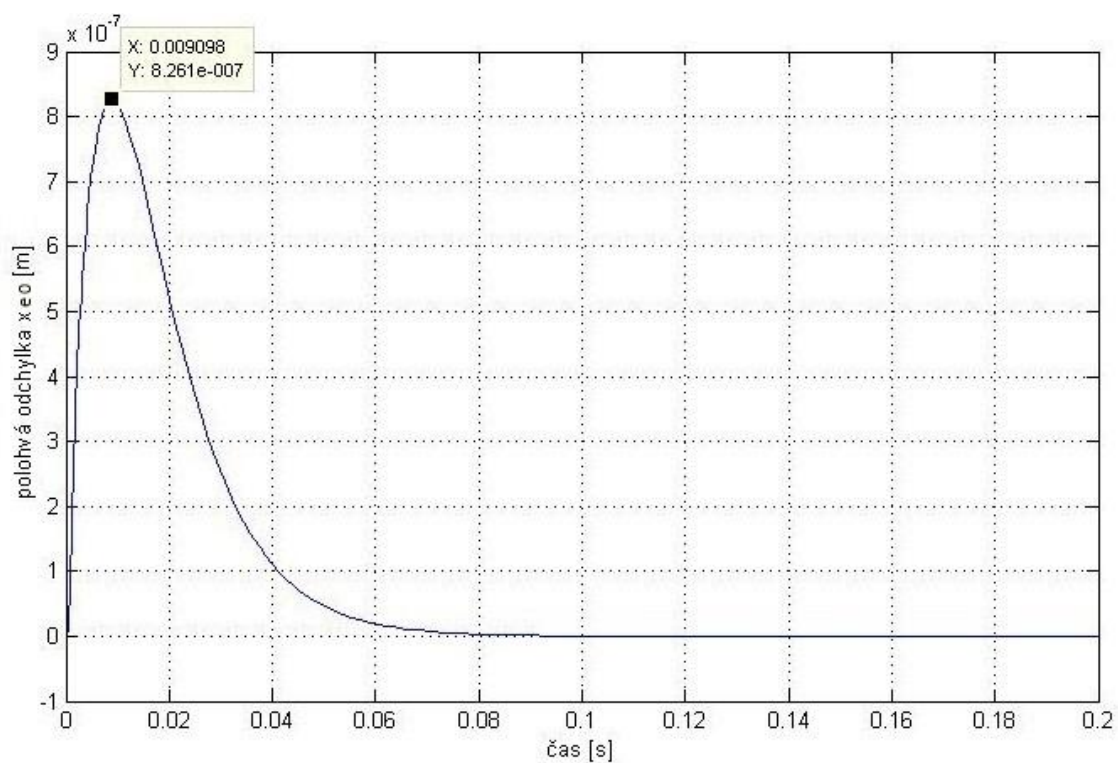
Obr. č. 31 – Polohová odchylka – odezva na skok žádané rychlosti ($f_0 = 100\text{Hz}$)



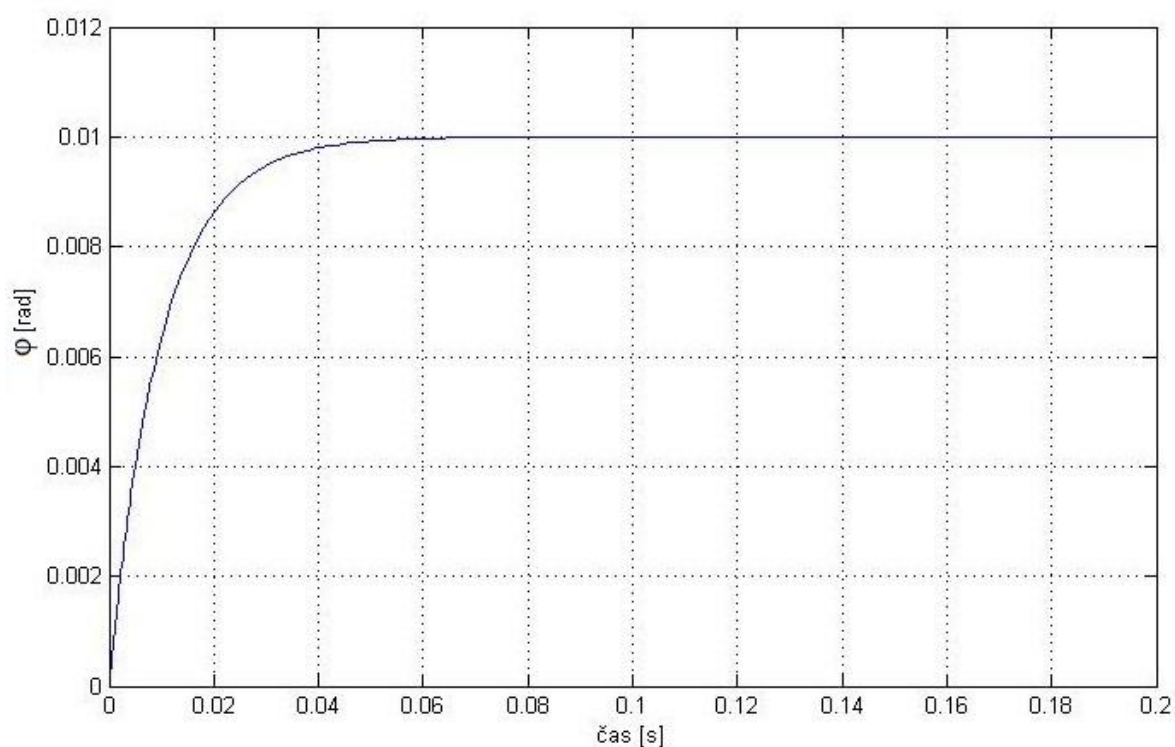
Obr. č. 32 – Přechodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 400\text{Hz}$



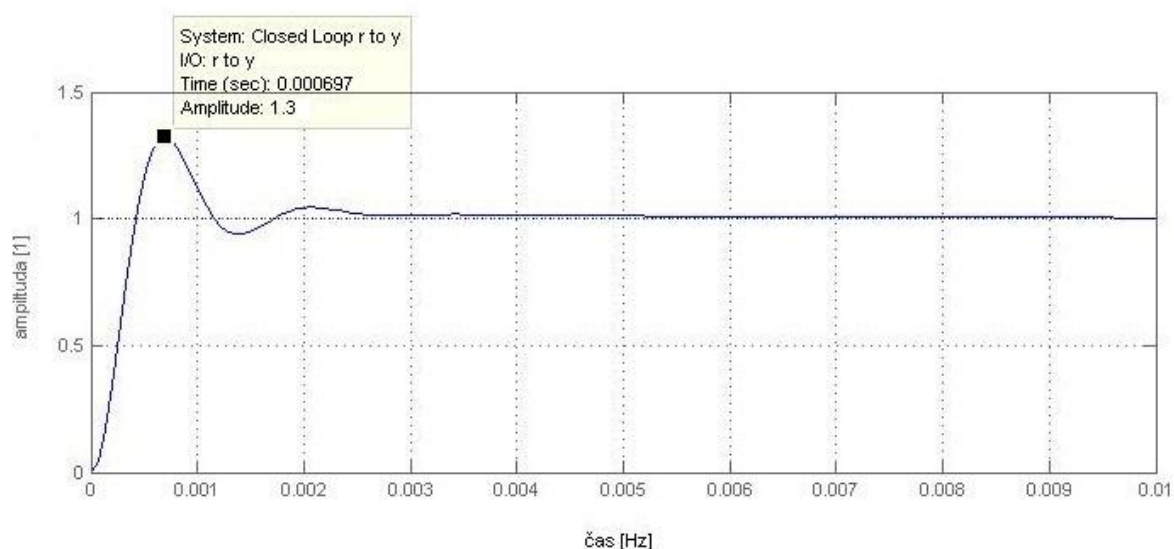
Obr. č. 33 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 400\text{Hz}$



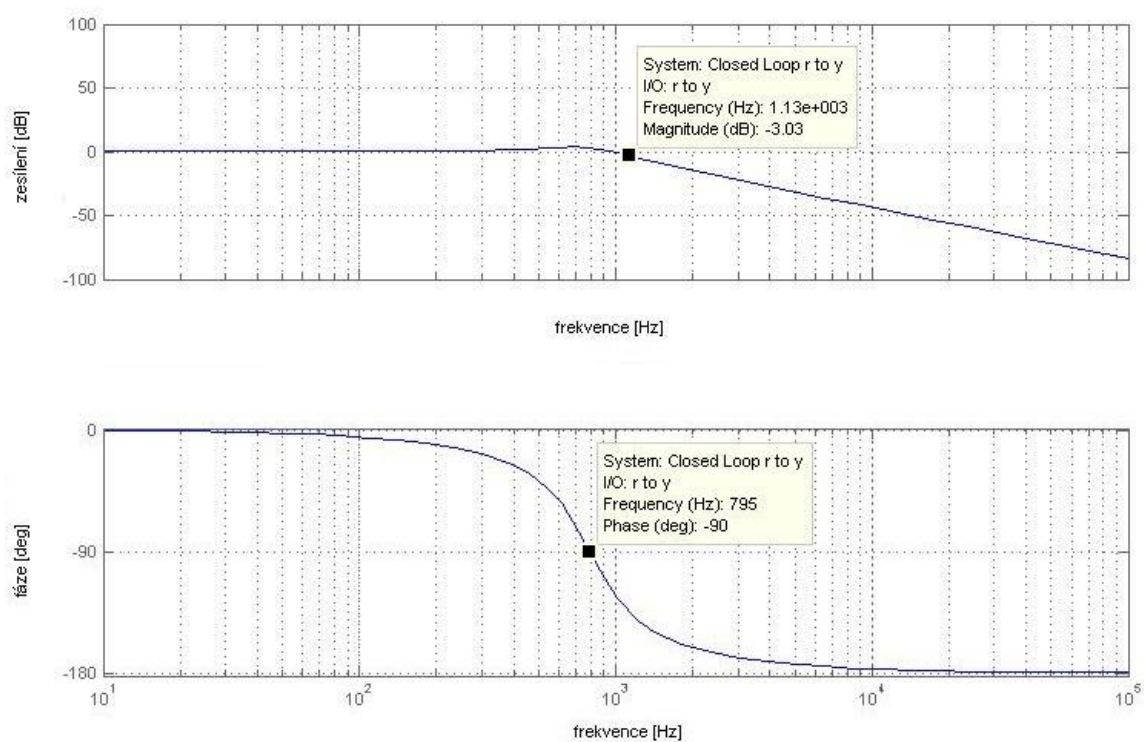
Obr. č. 34 – Polohová odchylka – odezva na skok síly $F_{ext} = 6000$ N ($f_0 = 400$ Hz)



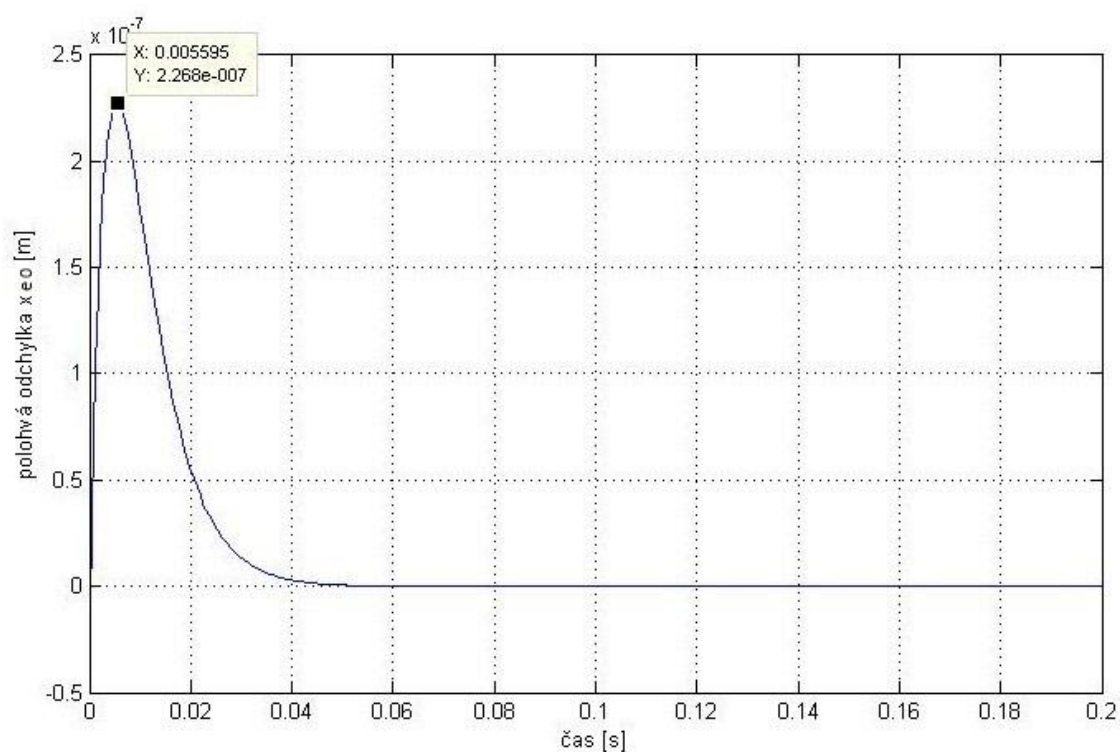
Obr. č. 35 – Polohová odchylka – odezva na skok žádané rychlosti ($f_0 = 400$ Hz)



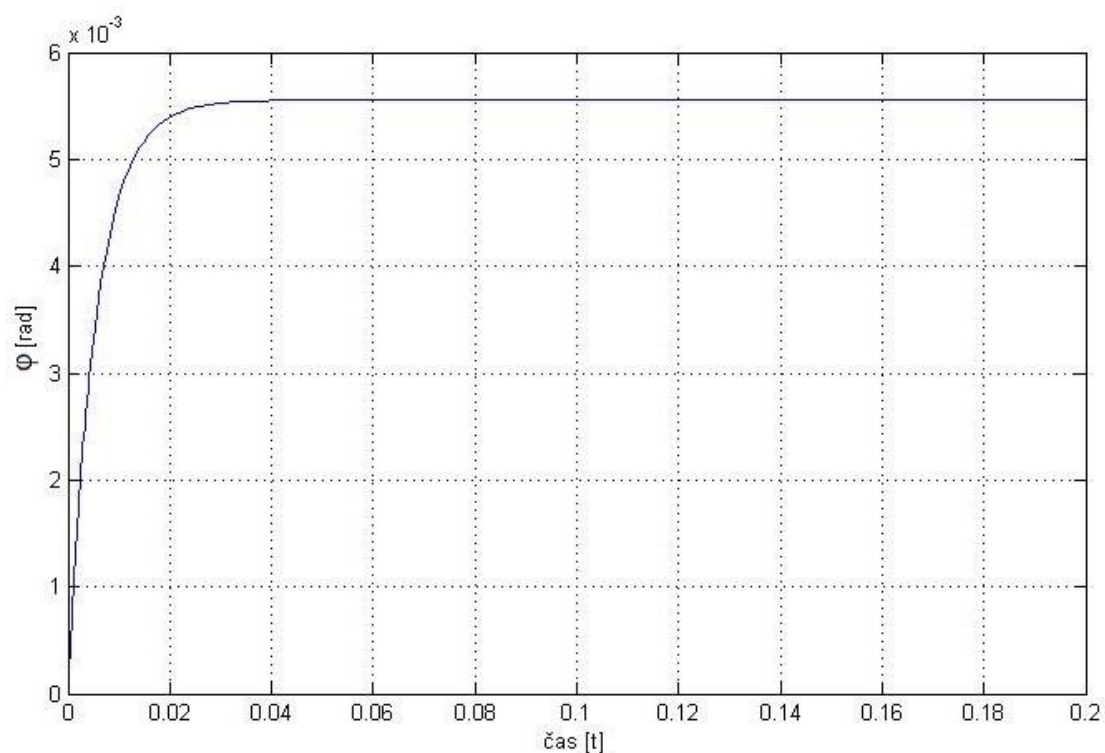
Obr. č. 36 – Přechodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 800\text{Hz}$



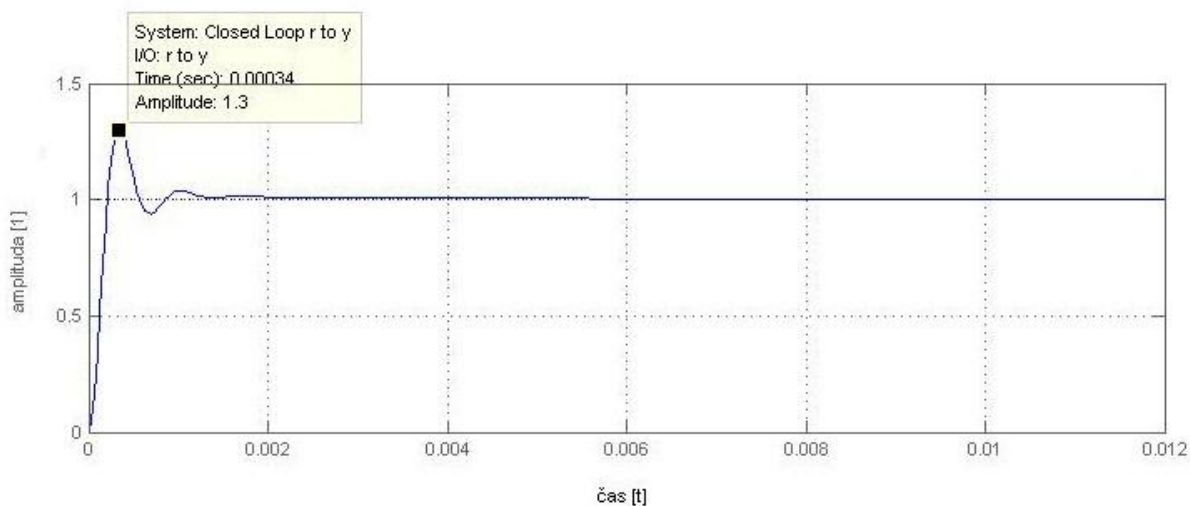
Obr. č. 37 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 800\text{Hz}$



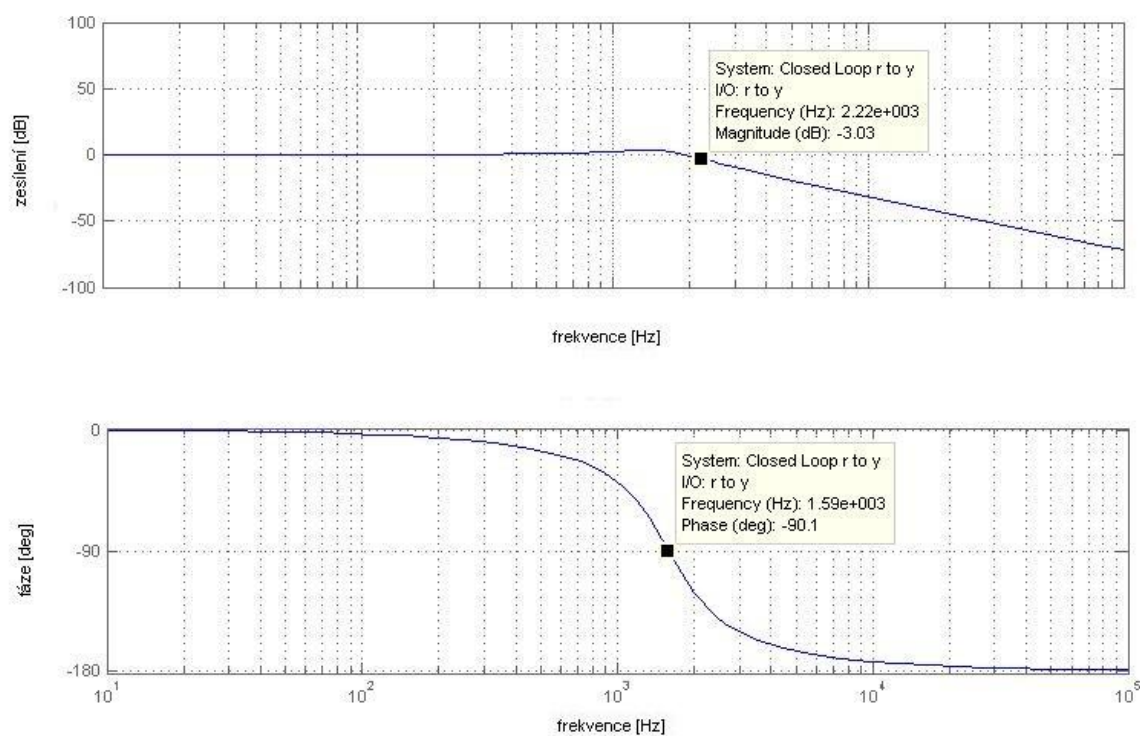
Obr. č. 38 – Polohová odchylka – odezva na skok síly $F_{ext} = 6000$ N ($f_0 = 800$ Hz)



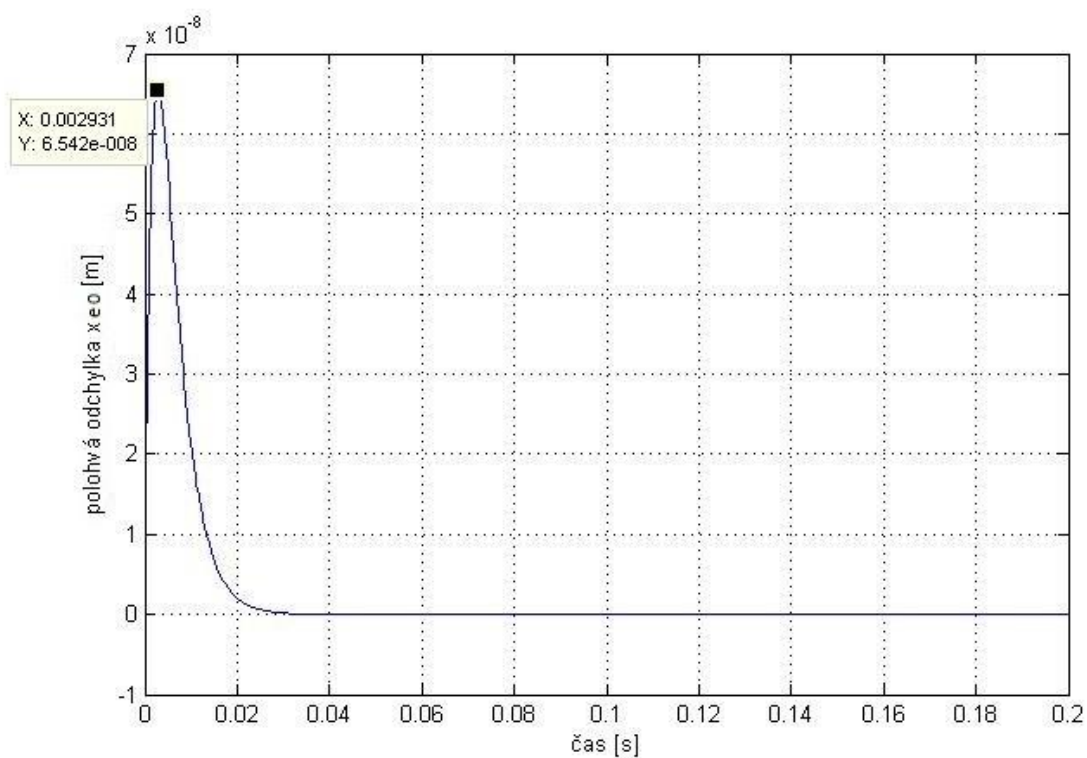
Obr. č. 39 – Polohová odchylka – odezva na skok žádané rychlosti ($f_0 = 800$ Hz)



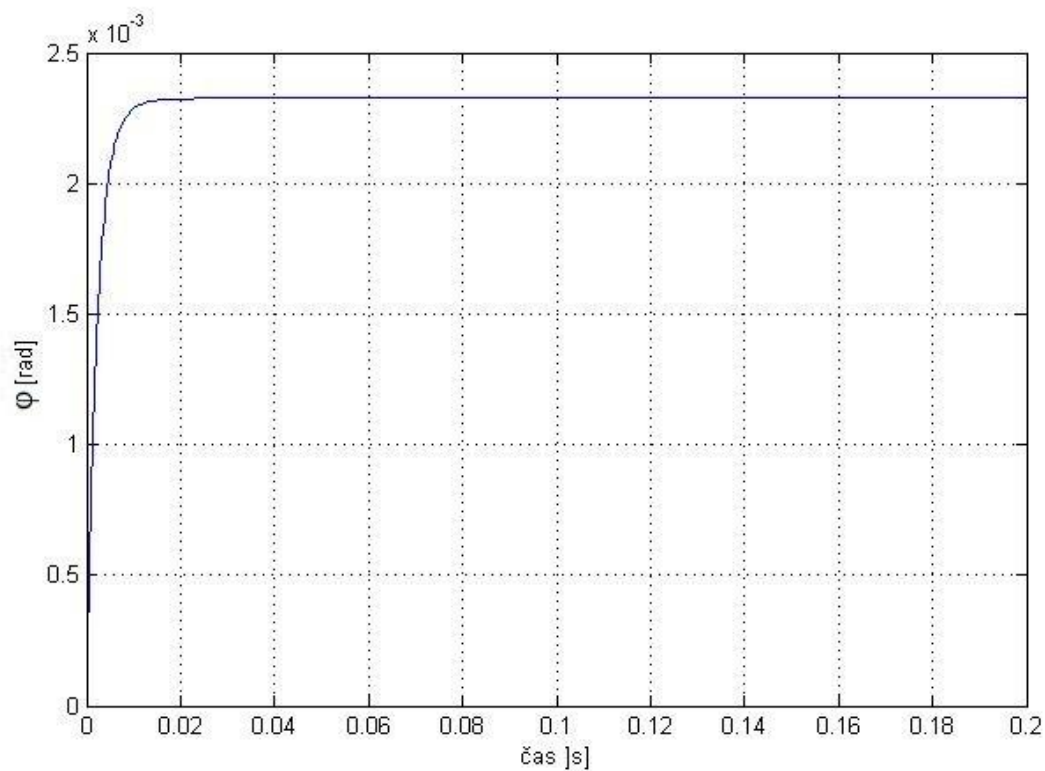
Obr. č. 40 – Přechodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 1\,600\text{Hz}$,



Obr. č. 41 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 1\,600\text{Hz}$



Obr. č. 42 – Polohová odchylka – odezva na skok síly $F_{\text{ext}} = 6000$ N ($f_0 = 1\,600$ Hz)



Obr. č. 43 – Polohová odchylka – odezva na skok žádané rychlosti ($f_0 = 1\,600$ Hz)

6.3. Seřízení polohové smyčky (s náhradním přenosem)

Po seřízení rychlostní smyčky jsme přikročili k nastavení parametrů polohové zpětné vazby. Ta je jedna z nejdůležitějších v celém systému regulace. Jejím úkolem je dosažení žádané hodnoty polohy a v systému je nadřazena rychlostní smyčce.

Parametry nastavení: zesílení rychlostního regulátoru (K_P), časová konstanta regulátoru (f_n), časová konstanta náhradního přenosu, polohové zesílení (K_V)

Pozn.:

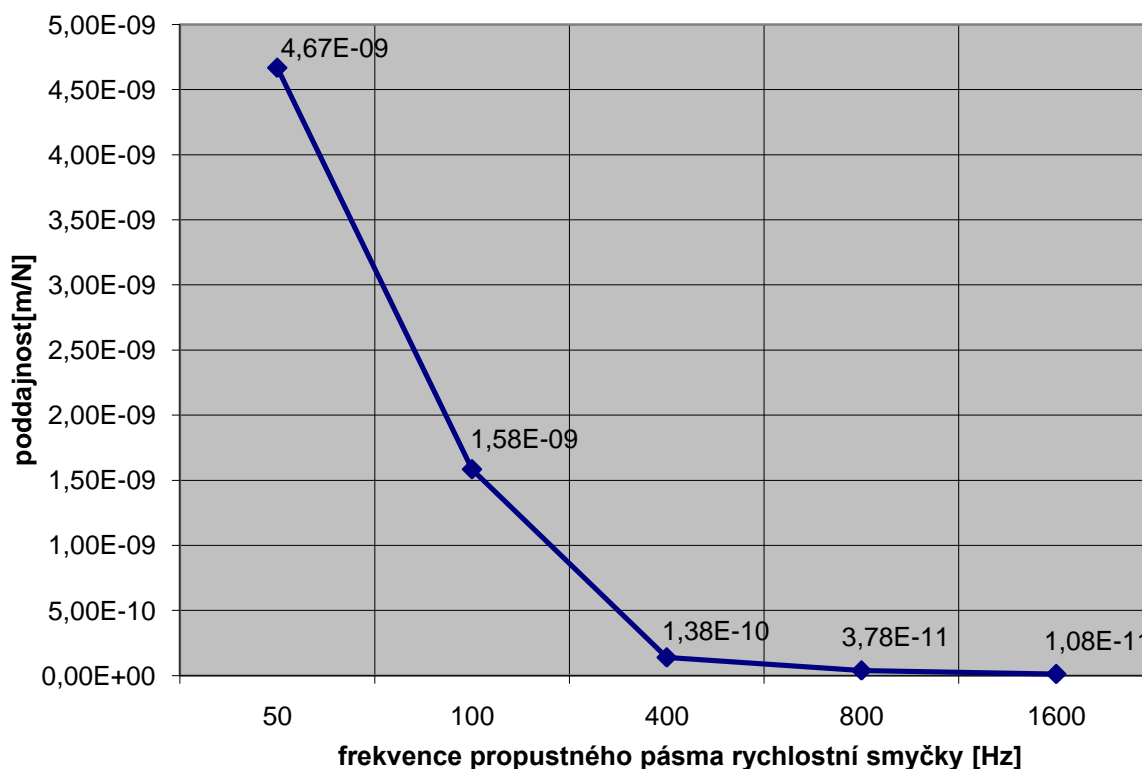
Polohové zesílení (K_V):

Při frekvenci propustného pásma 50 a 100 Hz bylo zesílení ověřeno na nespočet aplikacích. Z nich víme že $K_V=30$ je reálné pro výše zmíněné hodnoty propustných pásem .

Protože se jedná o silně zjednodušený model, u propustných pásem větších než 100 Hz nelze spolehlivě odhadnout reálnou velikost K_V . Proto byl zvolen postup, kdy bylo nastaveno K_V při kterém pohon vykazoval překmit při rozběhu 0,01 mm a pro další modelování bylo nastaveno K_V 10x menší.

frekvence propustného pásma rychlostní smyčky f_0 [Hz] / frekvence zlomu f_n [Hz]	zatěžující síla F_{ext} [N]	odchylka po skoku síly x_{e0} [m]	rázová dynamická poddajnost c_R [m/N]
50/10	6000	2,80E-05	4,67E-09
100/10	6000	9,50E-06	1,58E-09
400/20	6000	8,30E-07	1,38E-10
800/30	6000	2,27E-07	3,78E-11
1600/40	6000	6,50E-08	1,08E-11

Tab. č. 1 – závislost odchylky, resp. poddajnosti na propustném pásmu



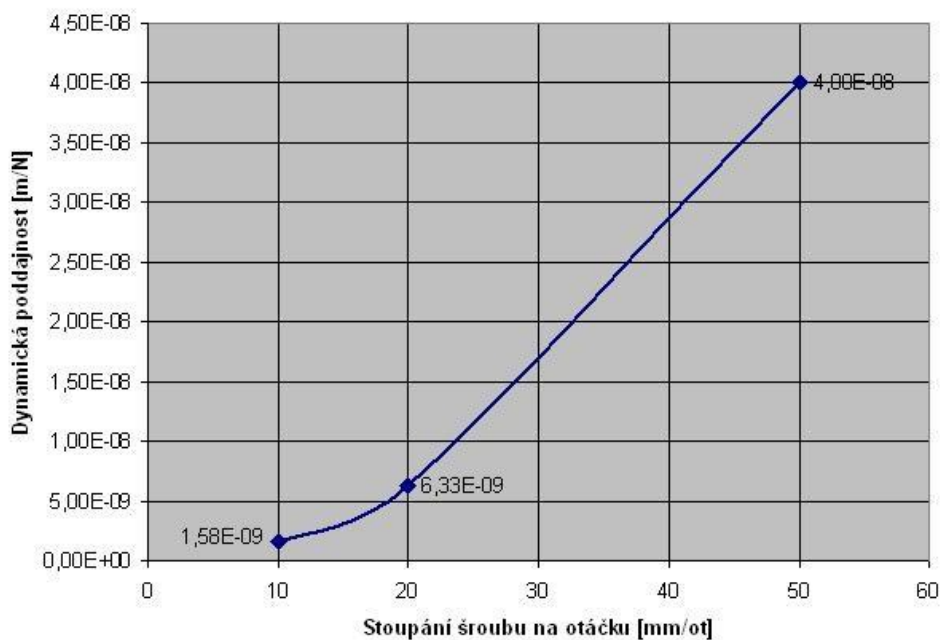
Obr. č. 44 – závislost poddajnosti na propustném pásmu

6.4. Závislost na stoupání šroubu

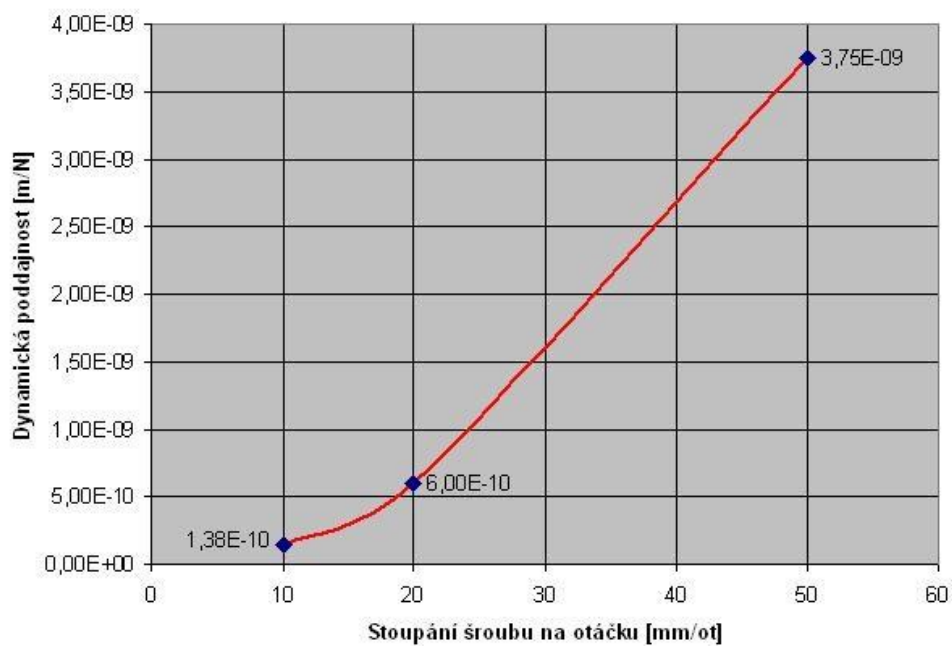
V současné době je kladen požadavek trhu na zvýšení posuvových rychlostí a zrychlení rozběhu a zastavení. Přechod na vysoké posuvové rychlosti si vynucuje zvětšení stoupání šroubů na otáčku. Jak plyne z rovnice výpočtu c_R (viz str. 53): se vzrůstající hodnotou stoupání šroubu, stoupá i hodnota dynamické poddajnosti (viz. tab. č. 2). Poměr této závislosti je takřka stejný pro všechny velikosti propustného pásma (viz. obr. č. 45 ÷ 48). Průběh této závislosti by měl být parabolický. Z malého množství hodnot ovšem není možné parabolický průběh zobrazit.

frekvence propustného pásma f_0 [Hz] / frekvence zlomu f_n [Hz]	Stoupání šroubu na otáčku h_s [mm/ot]	Špička polohové odchylky po skoku síly 6000 N x_{e0} [m]	$x_{e0}/x_{e0(50)}$	Rázová dynamická poddajnost [m/N]
50/10	10	$x_{e0(50)}=2,8 \text{ E-}05$	0,00E+00	4,67E-09
100/10	10	9,50E-06	3,39E-01	1,58E-09
	20	3,80E-05	1,36E+00	6,33E-09
	50	2,40E-04	8,57E+00	4,00E-08
400/20	10	8,30E-07	2,96E-02	1,38E-10
	20	3,60E-06	1,29E-01	6,00E-10
	50	2,25E-05	8,04E-01	3,75E-09
800/30	10	2,27E-07	8,11E-03	3,78E-11
	20	9,10E-07	3,25E-02	1,52E-10
	50	5,70E-06	2,04E-01	9,50E-10
1600/40	10	6,50E-08	2,32E-03	1,08E-11
	20	2,60E-07	9,29E-03	4,33E-11
	50	1,63E-06	5,82E-02	2,72E-10

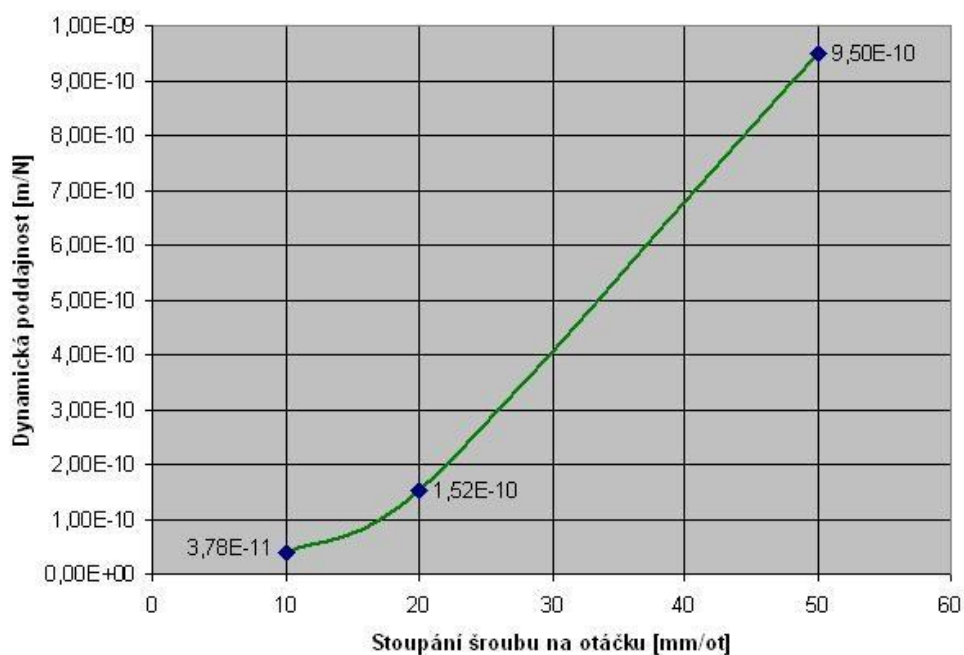
Tab. č. 2 – závislost dynamické poddajnosti na stoupání šroubu



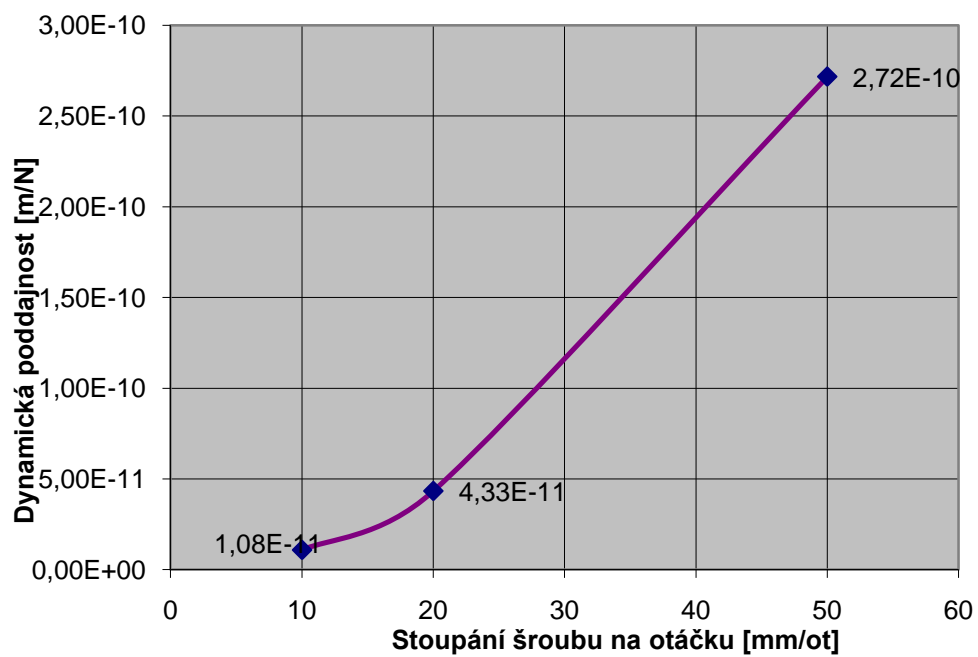
Obr. č. 45 – závislost poddajnosti na stoupání šroubu (100 Hz)



Obr. č. 46 – závislost poddajnosti na stoupání šroubu (400 Hz)



Obr. č. 47 – závislost poddajnosti na stoupání šroubu (800 Hz)



Obr. č. 48 – závislost poddajnosti na stoupání šroubu (1600 Hz)

7. Výpočet dynamické poddajnosti

Polohové zesílení: $K_V := 100 \left[\frac{1}{s} \right]$

Frekvence zlomu rychlostního regulátoru: $f_n := 20 \text{ [Hz]}$

Moment setrvačnosti: $J := 0.02 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$

Konstanta motoru: $K_m := 1 \left[\frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \right]; \left[\frac{\text{Nm}}{\text{A}} \right]$

Zesílení rychlostního regulátoru: $K_p := 7750 \left[\frac{\text{As}}{\text{rad}} \right]; \left[\frac{\text{As}}{\text{m}} \right]$

Stoupání šroubu: $h_s := 0.01 \left[\frac{\text{m}}{\text{ot}} \right]$

Časová konstanta rychlostního regulátoru:

$$T_n := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \quad T_n = 7.957747 \times 10^{-3} \text{ [s]}$$

Zesílení rychlostní smyčky:

$$K_R := \frac{K_p \cdot K_m}{J} \quad K_R = 3.875 \times 10^5 \left[\frac{1}{s} \right]$$

Celkový mechanický převod:

$$K_C := \frac{h_s}{2 \cdot \pi} \quad K_C = 1.591549 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}}{\text{rad}} \right]$$

$$\lambda := T_n \cdot K_V \quad \lambda = 0.795775 \text{ [1]}$$

Poddajnost:

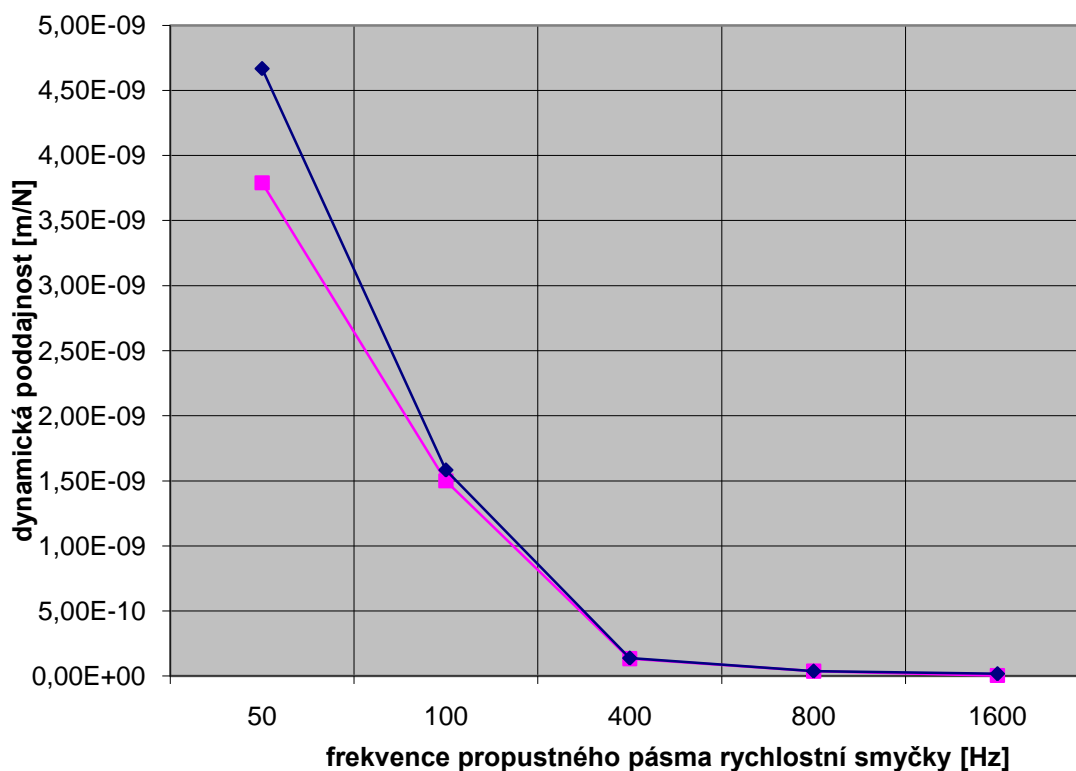
$$cr := \left[\frac{K_C^2}{(J \cdot K_R)} \right] \cdot \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \quad cr = 1.342029 \times 10^{-10} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

Výpočet byl odvozen pomocí lit. [9] a [7].

Výsledné hodnoty výpočtu dynamické poddajnosti jsou takřka totožné s hodnotami vyplývajícími z programu Matlab Simulink. Největší rozdíl hodnot výpočtu od simulace (s náhradním přenosem $\pm 23 \%$) je u hodnoty pro propustné pásmo 50 Hz (viz. tab. č. 3, resp. obr. č. 49). Odchylka je pravděpodobně způsobena rozdílem mezi modelem s náhradním přenosem (obr. č. 22) a modelem který je základem pro výpočet (obr. č. 20).

Frekvence propustného pásma rychlostní smyčky [Hz]	50	100	400	800	1600
Dynamická poddajnost-matlab [m/N]	4,67E-09	1,58E-09	1,38E-10	3,78E-11	1,08E-11
Dynamická poddajnost-výpočet [m/N]	3,79E-09	1,50E-09	1,34E-10	3,70E-11	4,09E-12

Tab. č. 3 – rozdíl výpočtů od simulace



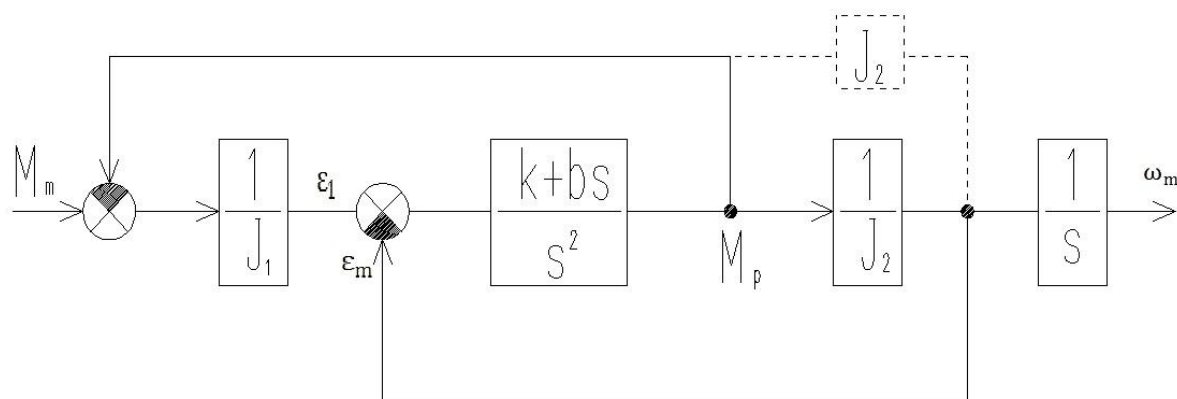
Obr. č. 49 – graf rozdílu hodnot poddajností výpočtem a simulací ($h_s = 10 \text{ mm/ot}$)

8. Dvouhmotový model motoru

Předešlé modely servopohonu jsme uvažovali pouze jako jednohmotové. Moment setrvačnosti „J“ v sobě zahrnoval všechny hmoty servomechanismu redukované na motor. Protože klasický model motoru umožňoval nastavit nereálně vysokou dynamiku rychlostní smyčky, byl k pohonu připojen náhradní přenos zhoršující dynamiku (viz. kap. rychlostní smyčka).

V následném dvouhmotovém modelu motoru je náhradní přenos nahrazen kmitavým členem motoru. Odlišnost od modelu s náhradním přenosem (viz. obr. č. 20 resp. 22) je především v přítomnosti kmitů na frekvenci Ω_2 (viz. obr. č. 51). Tyto kmity lze potlačit filtrem 2. řádu (pásmová zádrž). Model byl pro dané propustné pásmo seřizován stejným postupem jako při použití náhradního přenosu (str. 36; 48). Místo změny časové konstanty byla měněna vlastní frekvence Ω_2 , poměrné tlumení $\xi_2 \approx 0,05$.

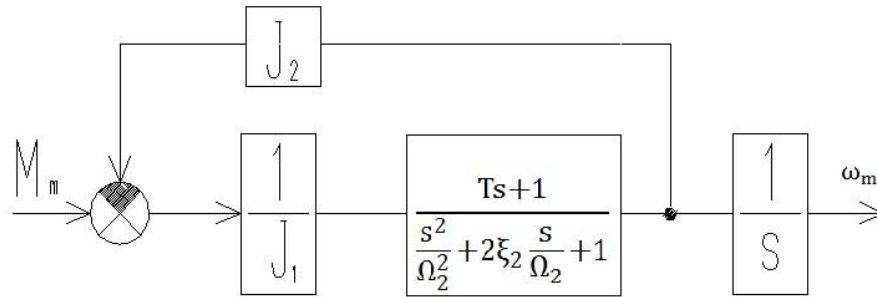
8.1. Odvození přenosu pro dvouhmotový model motoru



Obr. č. 50 – model motoru

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_1} = \frac{\frac{bs+k}{s^2 J_2}}{\frac{s^2 J_2 + bs + k}{s^2 J_2}} = \frac{\frac{b}{k} s + 1}{\frac{s^2}{\Omega_2^2} + 2\xi_2 \frac{s}{\Omega_2} + 1}$$

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{k}{J_2}}, \quad \xi_2 = \frac{1}{2} \frac{b}{\sqrt{k \cdot J_2}}$$



Obr. č. 51 – model motoru

$$\frac{\varepsilon_m}{M_m} = \frac{\frac{1}{J_1} \frac{s^2}{\Omega_2^2} + 2\xi_2 \frac{s}{\Omega_2} + 1}{\frac{s^2}{\Omega_2^2} + 2\xi_2 \frac{s}{\Omega_2} + 1 + \frac{J_2}{J_1} (T_s + 1)} = \frac{\frac{1}{J_1} (T_s + 1)}{\frac{J_2}{k} s^2 + \frac{b}{k} s + 1 + \frac{J_2}{J_1} \left(\frac{b}{k} s + 1 \right)} =$$

$$= \frac{\frac{1}{J_1} (T_s + 1)}{\frac{J_2}{k} s^2 + \frac{b}{k} s \left(\frac{J_1 + J_2}{J_1} \right) + \frac{J_1 + J_2}{J_1}} = \frac{J_1}{J_1 + J_2} \frac{1}{J_1} \frac{T_s + 1}{\frac{J_1 J_2}{k(J_1 + J_2)} s^2 + \frac{b}{k} s + 1}$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{k(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} = \sqrt{\frac{k}{J_2}} \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1}} = \Omega_2 \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1}}$$

$$\frac{2\xi}{\Omega} = \frac{b}{k}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \Omega \frac{b}{k} = \frac{1}{2} \frac{b}{k} \sqrt{\frac{k(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} = \xi_2 \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1}}$$

$\varepsilon_m \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$... zrychlení na hřídeli motoru

$\varepsilon_1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$ zrychlení rotorového paketu

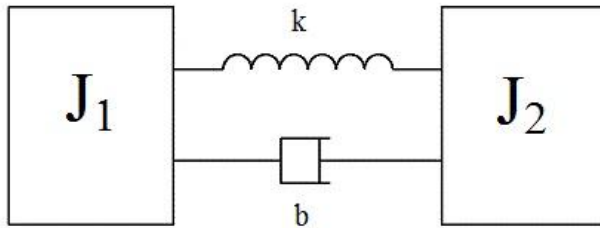
$\xi[1]$ poměrné tlumení

$\Omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ vlastní frekvence kmitavého členu 2. řádu

Předpoklady:

1) $\Omega_2 = 600 \cdot 2\pi \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$

2)



$$J_m = J_1 + J_2$$

$$J_1 \doteq 5 \cdot J_2 \text{ (odhad)}$$

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{k}{J_2}} \quad , \quad \xi_2 \approx 0,05$$

J_1 - pravděpodobně moment setrvačnosti paketu plechů

J_2 - pravděpodobně moment setrvačnosti hřídele

8.2. Polohová a rychlostní smyčka

Blokové schéma je na obr. č. 52. Přechodový děj a frekvenční charakteristika rychlostní smyčky je na obr. č. 53 až 56 (53 – přechodová charakteristika bez filtru, 54 – frekvenční charakteristika bez filtru; 55 – přechodová charakteristika s filtrem, 56 – frekvenční charakteristika s filtrem).

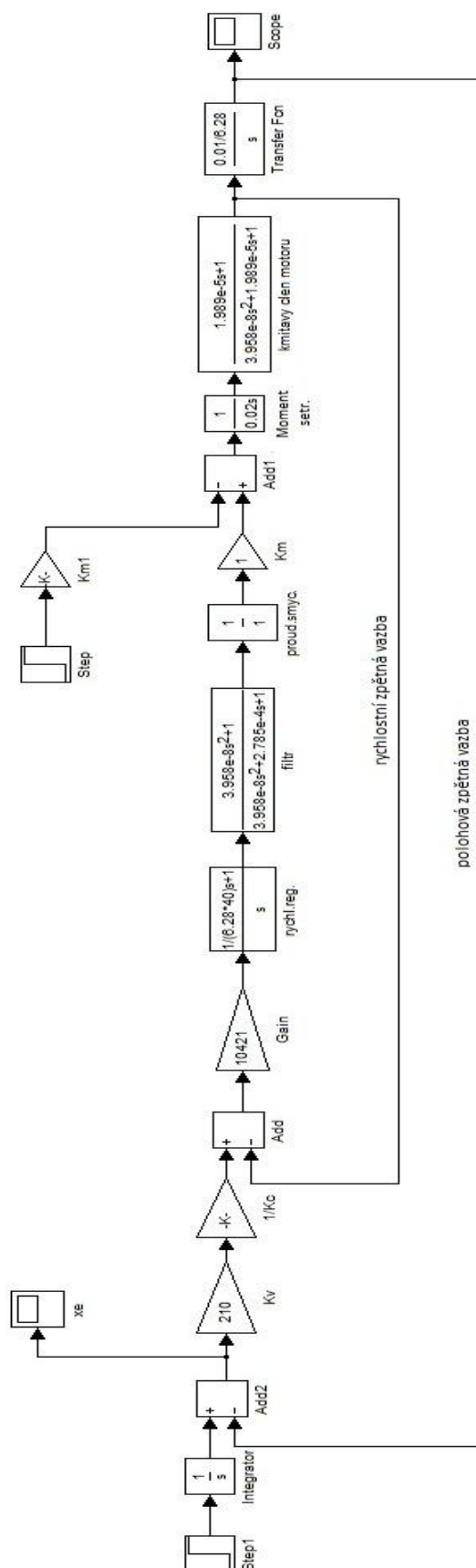
Jak z přechodové charakteristiky (obr. č. 53), tak z frekvenční charakteristiky (obr. č. 54) je zřejmé, že pohon výrazně kmitá na frekvenci $\Omega_2 = 2\pi \cdot 800 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$. Při tom je propustné pásmo f_0 (-3 dB) jen 83 Hz. Proto byl do obvodu zařazen filtr (pásmová zadrž – viz též obr. č. 52) s přenosem:

$$\frac{\frac{s^2}{\Omega_2^2} + 1}{\frac{s^2}{\Omega_2^2} + 2\xi_F \frac{s}{\Omega} + 1}$$

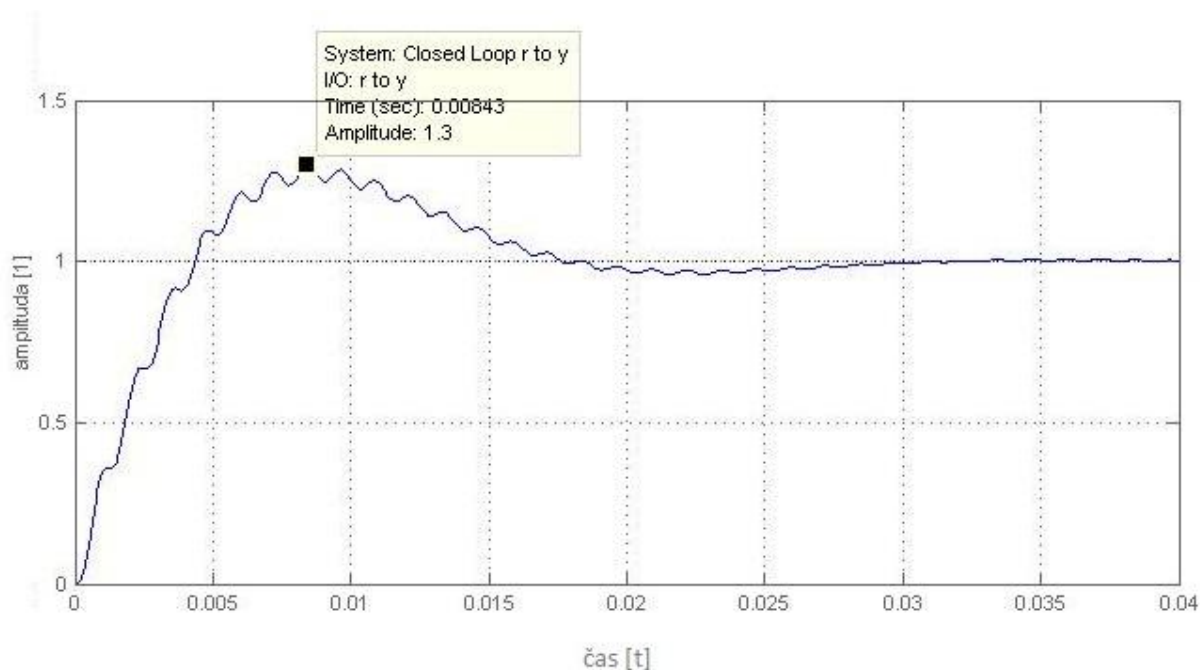
$$\Omega_2 = 2\pi \cdot 800 = 5024 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$\xi_F = 0,7$$

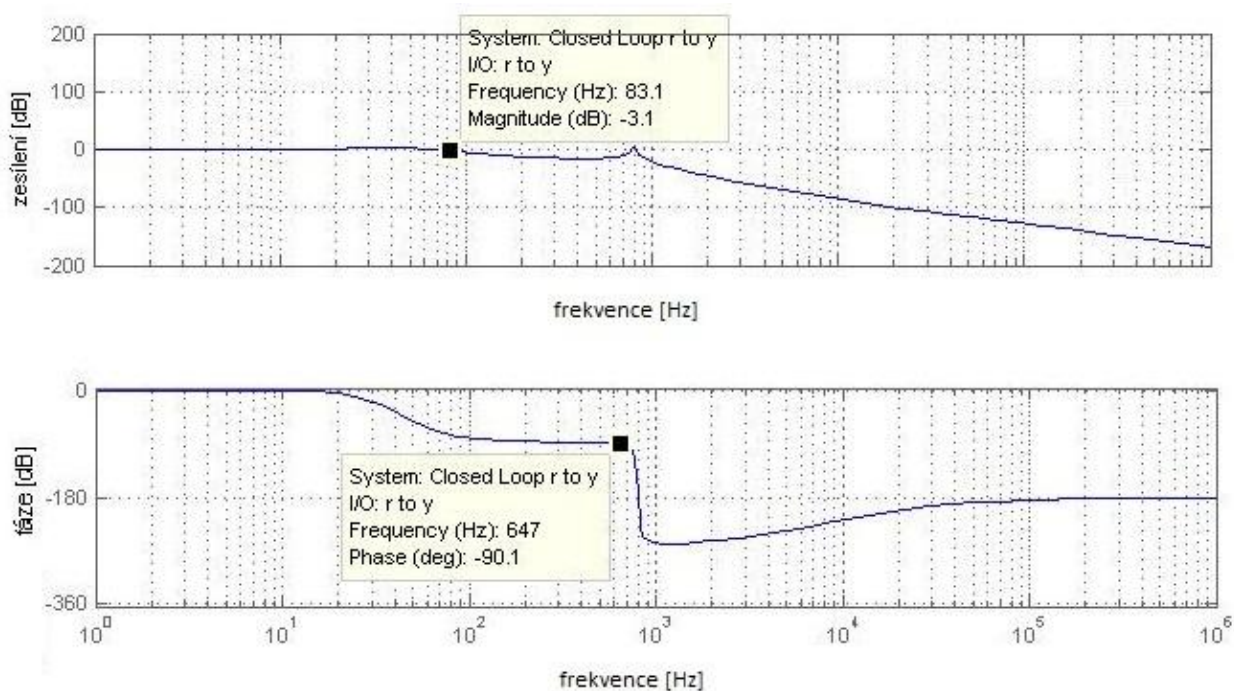
Zařazení filtru umožnilo výrazně zvýšit zesílení rychlostní smyčky – výsledek je zobrazen na obr. č. 55 a 56. Bylo dosaženo požadované propustné pásma rychlostní smyčky $f_0(90^\circ) = 420 \text{ Hz}$ ($f_0(-3\text{dB}) = 661 \text{ Hz}$) při překmitu přechodové charakteristiky 1,3.



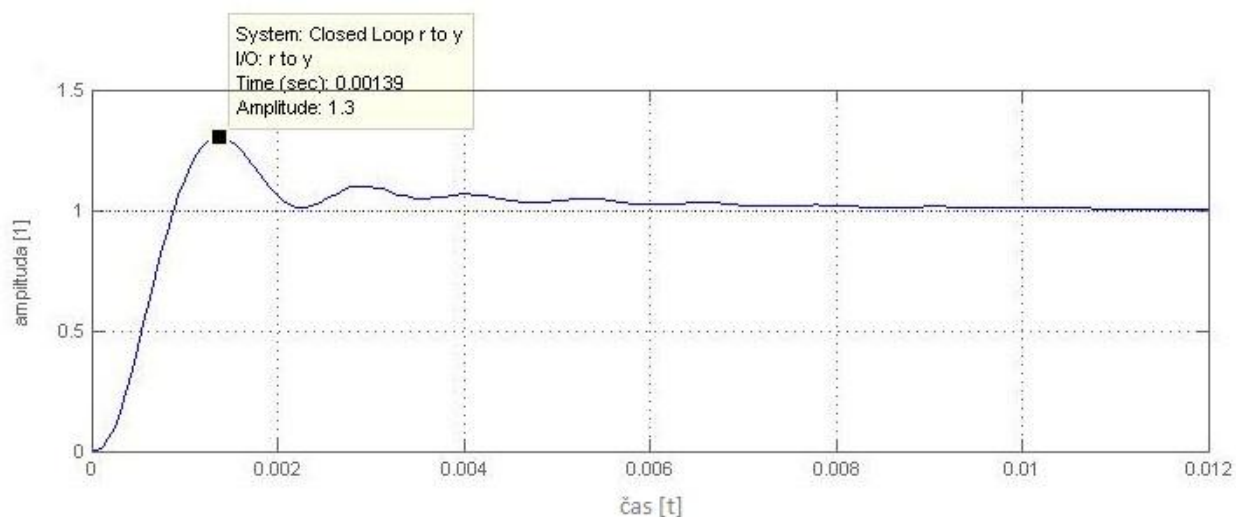
Obr. č. 52 – blokové schéma polohové smyčky



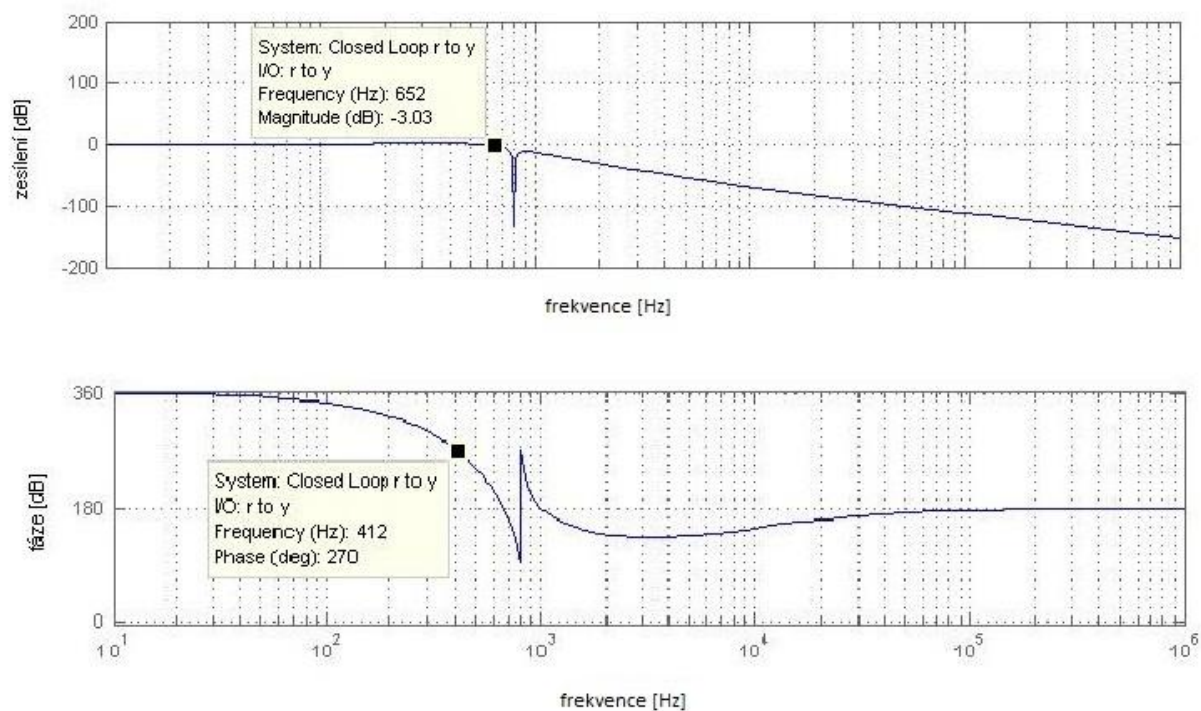
Obr. č. 53 – přechodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 400\text{Hz}$ (bez filtru)



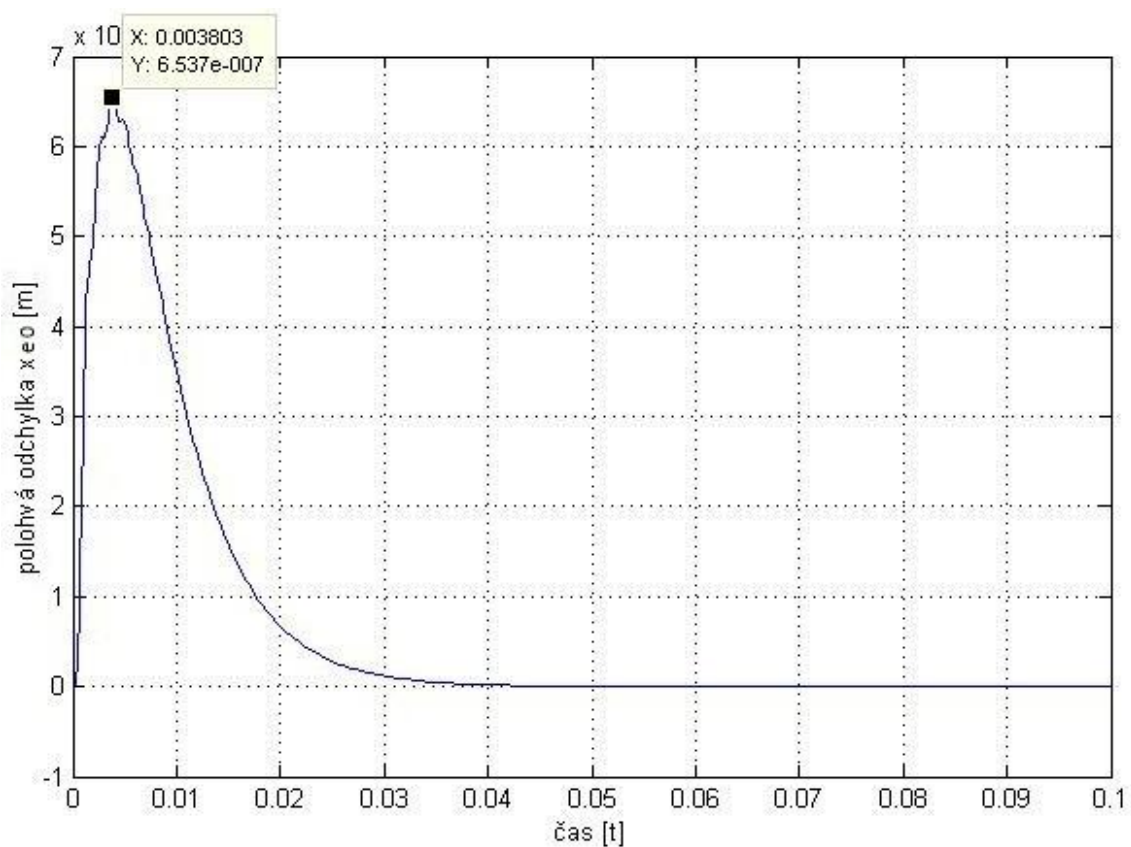
Obr. č. 54 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 400\text{Hz}$ (bez filtru)



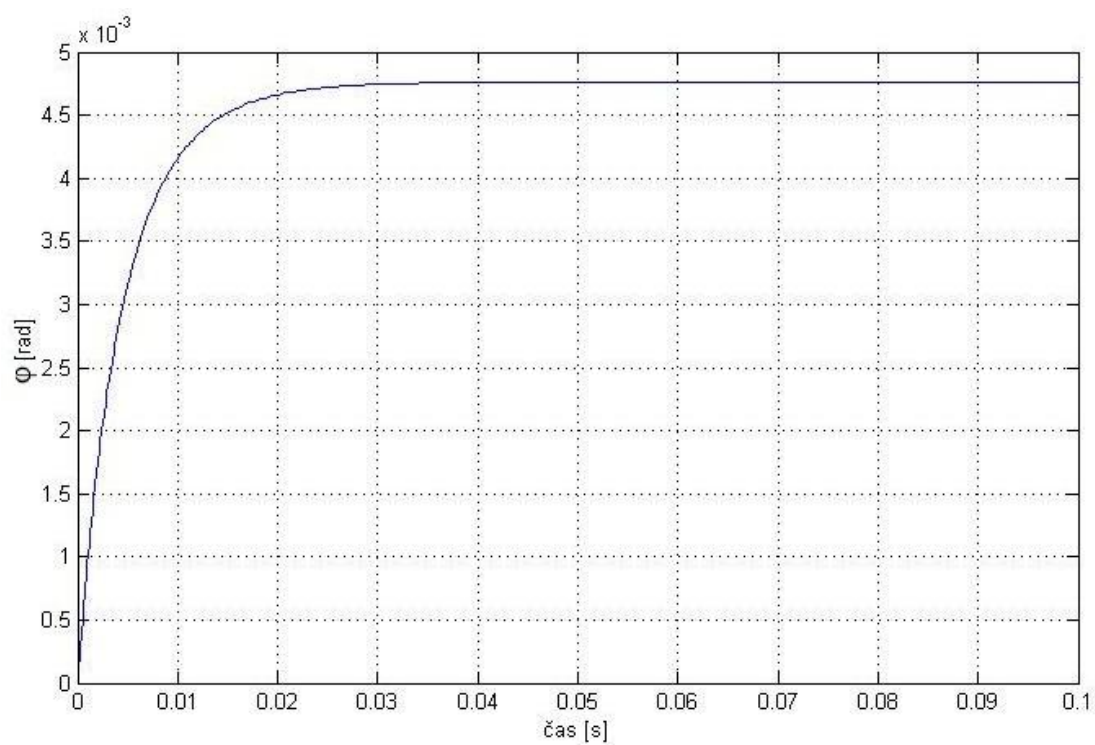
Obr. č. 55 – přechodová charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 400\text{Hz}$



Obr. č. 56 – Frekvenční charakteristika rychlostní smyčky $f_0 = 400\text{Hz}$



Obr. č. 57 – Polohová odchylka – odezva na skok síly $F_{ext} = 6000$ N ($f_0 = 400$ Hz)



Obr. č. 58 – Polohová odchylka – odezva na skok žádané rychlosti ($f_0 = 400$ Hz)

9. Závěr

V práci byl popsán postup sestavení regulační části modelu servopohonu, a také seřízení parametrů zpětnovazebních smyček – rychlostní a polohové. Parametry těchto smyček byly často voleny metodou zkusmo. I přes poměrně velké zjednodušení modelu pohonu jsou výsledné hodnoty reálné, což bylo ověřeno i výpočtem (viz. kapitola č. 7).

Z obr. č. 44 a tab. č. 1 vyplývá, že pro rotační pohony nemá příliš velký význam používání pohonů s propustným pásmem rychlostní smyčky větší než 400 Hz. Špička polohové odchylky pro $f_0 = 400$ Hz je $x_{eo} = 0,8 - 3,6 - 22 \mu\text{m}$ pro stoupání šroubu $h_s = 10 - 20 - 50$ mm/ot (viz. tab. č. 2). Mimo to propustné pásmo rychlostní smyčky je omezeno nejnižší vlastní frekvencí mechaniky stroje, která prakticky nemůže přesáhnout 400 Hz. Je tedy zřejmé, že v tomto ohledu vývoj pohonů předstihl současné možnosti klasické mechaniky (motor – šroub – suport).

Pohony s vysokou dynamickou tuhostí však výrazně zlepší vlastnosti přímých pohonů, kde není problém docílit nejnižší mechanickou frekvenci $1 \div 1,5$ kHz. Bohužel rozbor vlastností přímých pohonů by se vymykal rozsahu této práce.

Dynamická tuhost pohonu v podstatě určuje velikost kvadrantových chyb při kruhové interpolaci. Kvadrantové chyby je možné jen obtížně a neúplně kompenzovat (zhruba $30 \div 50\%$ hodnoty bez kompenzace).

Seznam použité literatury

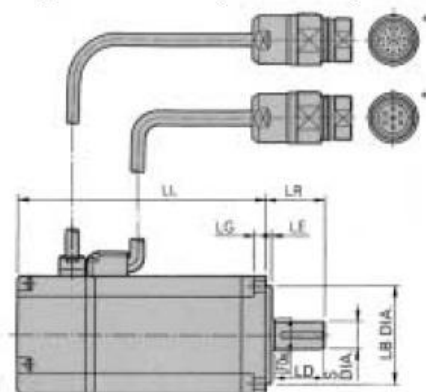
- [1] Dušek, F., Honc, D.: Matlab a Simulink. Úvod do používání. Skripta, Univerzita Pardubice, fakulta chemicko-technologická, Pardubice 2005
- [2] Kozák, Š.: Matlab – simulink. Skripta, STU Bratislava 1999
- [3] Lachman, M.: Regulace přesných polohových servopohonů při vysokých rychlostech. Disertační práce, TUL 2005
- [4] Medřický, R.: Modelování a identifikace tření u vysoce přesných polohových servomechanismů. Disertační práce, TUL 2006
- [5] Olehla, M., Němeček, S.: Základy aplikované kybernetiky. Skripta, TUL 2005
- [6] Skalla, J.: Návrh a dimenzování polohových servomechanismů obráběcích strojů. Habilitační práce, TUL 1995
- [7] Skalla, J.: Dynamika pohonů posuvů a její vztah k přesnosti servomechanismů, Referát, mezinárodní kongres MATAR, Praha 2004
- [8] Skalla, J.: Dynamické chyby dráhy při interpolaci NC obráběcích strojů. Teze, TUL 2003
- [9] Souček, P.: Servomechanismy ve výrobních strojích. Publikace, ČVUT v Praze 2004
- [10] Souček, P., Bubák, A.: Vysoce dynamické pohony posuvů obráběcích strojů. Publikace, ČVUT v Praze 2002
- [11] Souček, P.: Regulační pohony v posuvech NC strojů. Příloha MM Průmyslové spektrum, Praha 2010
- [12] Rydlo, P.: Řízení elektrických střídavých pohonů. Skripta, fakulta mechatroniky, TUL 2007

10. Přílohy

Příloha č. 1

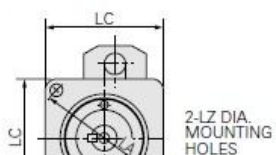
Rozměry rotačních elektrických motorů pro pohony firmy YASKAWA

● Type SGMAH (230/400V)



* Made by Interconnectron

Type SGMAH	LL	LC	LA	LZ	LG	LB	LE	LD	LF	S	LR	Approx. Mass kg
- A3	69.5	40	46	4.3	5	30 ⁰ _{-0.021}	2.5	-	-	6 ⁰ _{-0.008}	25	0.3
- A5	77											0.4
- 01	94.5											0.5
- 02	96.5	60	70	5.5	6	50 ⁰ _{-0.025}	3	-	-	14 ⁰ _{-0.011}	30	1.1
- 03 D	124.5											1.7
- 04 A												
- 07 D												
- 08 A	145	80	90	7	8	70 ⁰ _{-0.03}	3	35	20	16 ⁰ _{-0.011}	40	3.4

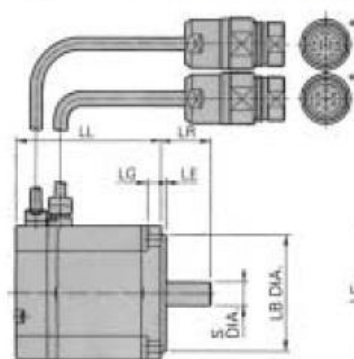


SGMAH-A3,-A5,-01



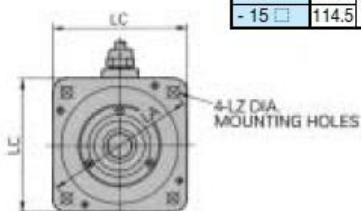
SGMAH-02,-04,-08

● Type SGMPH (230/400V)

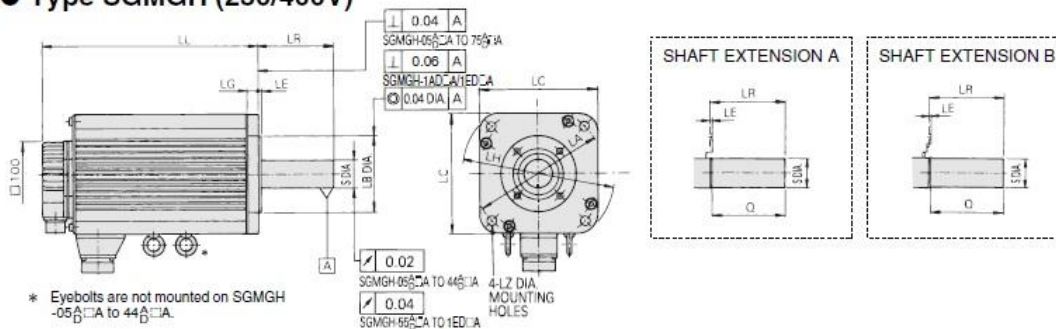


* Made by Interconnectron

Type SGMPH	LL	LC	LA	LZ	LG	LB	LE	S	LR	Approx. Mass kg
- 01	62	60	70	5.5	6	50 ⁰ _{-0.025}	3	8 ⁰ _{-0.009}	25	0.7
- 02	67	80	90	7	8	70 ⁰ _{-0.03}	3	14 ⁰ _{-0.011}	30	1.4
- 04	87									2.1
- 08	86.5									4.2
- 15	114.5	120	145	10	10	110 ⁰ _{-0.035}	3.5	16 ⁰ _{-0.011}	40	6.6

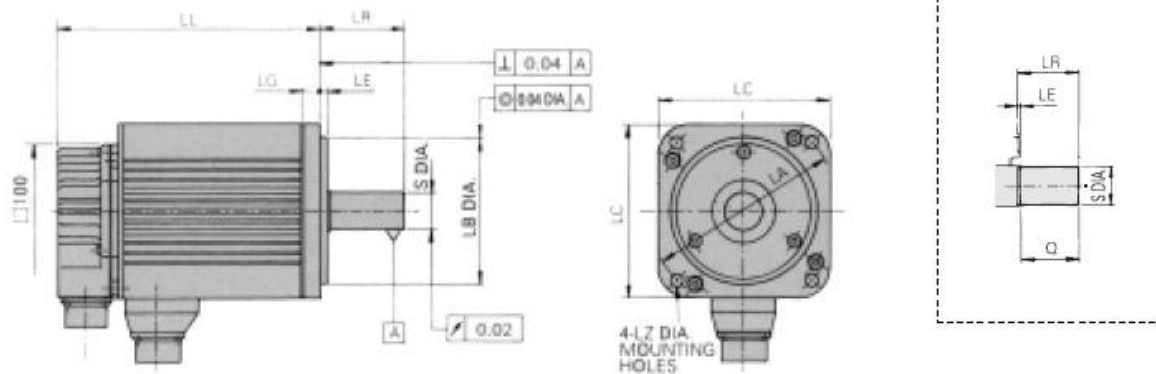














● Type SGMGH (230/400V)



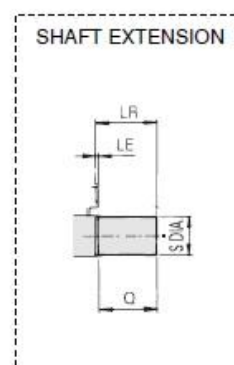
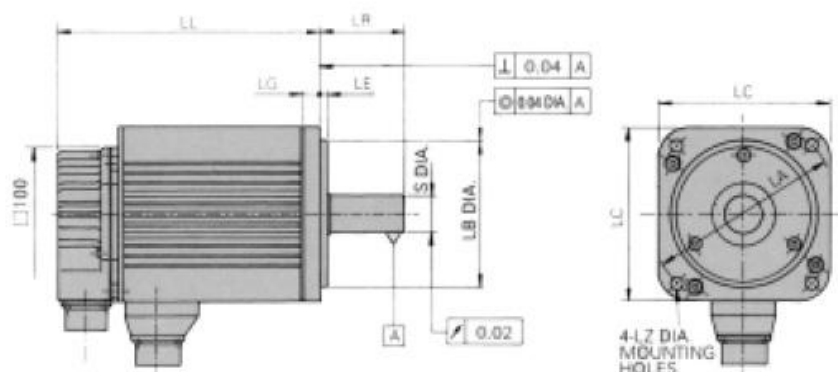
Type SGMGH	L	LL	LR	Flange							Shaft Extension			Approx. Mass kg
				LA	LB	LC	LE	LG	LH	LZ	Dwg.	S	Q	
-05A	196	138									A	19 ⁰ _{-0.013}	40	5.5
-09A	219	161	58	145	110 ⁰ _{-0.035}	130	6	12	165	9	A	22 ⁰ _{-0.013}	40	7.6
-13A	243	185										22 ⁰ _{-0.013}		9.6
-20A	245	166										35 ^{+0.01} ₀	76	14
-30A	271	192	79								B	35 ^{+0.01} ₀	76	18
-44A	305	226		200	114.3 ⁰ _{-0.025}	180	3.2	18	230	13.5	B	42 ⁰ _{-0.016}	110	23
-55A	373	260										42 ⁰ _{-0.016}	110	30
-75A	447	334	113									55 ^{+0.030} _{-0.011}	110	40
-1AD	454	338						18			A	42 ⁰ _{-0.016}	110	57.5
-1ED	573	457	116	235	200 ⁰ _{-0.045}	220	4	20	270	13.5	A	55 ^{+0.030} _{-0.011}	110	86

● Type SGMSH (230/400V)



Type SGMSH	LL	LR	Flange						Shaft Extension		Approx. Mass kg
			LA	LB	LC	LE	LG	LZ	S	Q	
- 10  	149	45	115	95 ⁰ _{-0.035}	100	3	10	7	24 ⁰ _{-0.013}	40	4.6
- 15  	175										5.8
- 20  	198										7.0
- 30  	199	63	145	110 ⁰ _{-0.035}	130	6	12	9	28 ⁰ _{-0.013}	55	11
- 40  	236										14
- 50  	276										17

● Type SGMSH (230/400V)



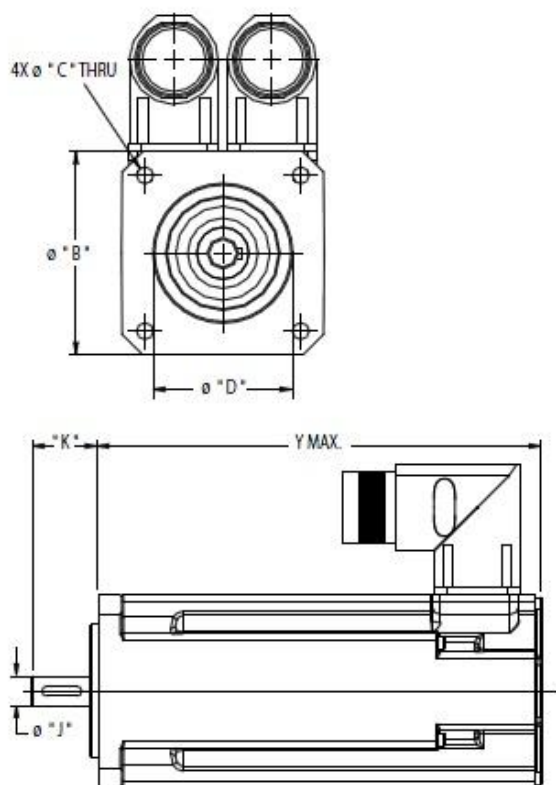
Type SGMSH	LL	LR	Flange						Shaft Extension		Approx. Mass kg
			LA	LB	LC	LE	LG	LZ	S	Q	
- 10 $\frac{A}{D} \square A$	149	45	115	95 $\frac{0}{-0.035}$	100	3	10	7	24 $\frac{0}{-0.013}$	40	4.6
- 15 $\frac{A}{D} \square A$	175										5.8
- 20 $\frac{A}{D} \square A$	198										7.0
- 30 $\frac{A}{D} \square A$	199	63	145	110 $\frac{0}{-0.035}$	130	6	12	9	28 $\frac{0}{-0.013}$	55	11
- 40 $\frac{A}{D} \square A$	236										14
- 50 $\frac{A}{D} \square A$	276										17

Příloha č. 2

Rozměry rotačních elektrických motorů pro AKM firmy KOLLMORGAN

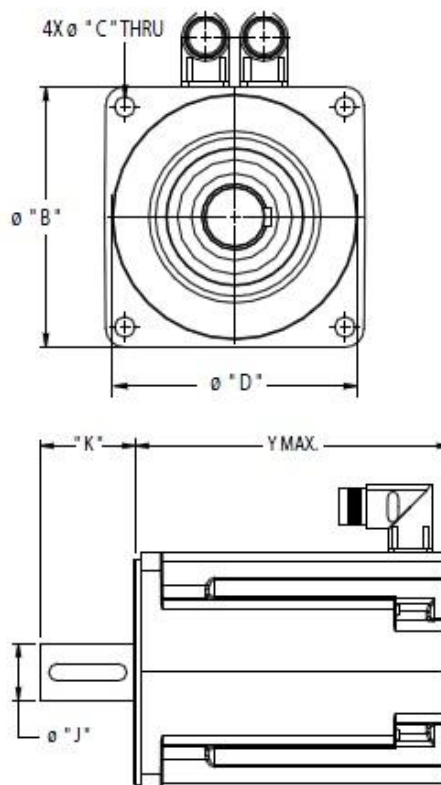
Model AKM23

Outline indicative of AKM1 – AKM4



Model AKM63

Outline indicative of AKM5 – AKM7



Dimensions (mm)

Model	Shaft **	Shaft Length	Mount Hole **	Length 1 stack (AKMx1)	Length 2 stack (AKMx2)	Length 3 stack (AKMx3)	Length 4 stack (AKMx4)	Length 5 stack (AKMx5)	Brake Adder	Sine Enc. Adder *
	"J"	"K"	"C"	"Y"	"Y"	"Y"	"Y"	"Y"		
AKM1	8	25	4.3	79	98	117	n/a	n/a	n/a	n/a
AKM2	9	20	4.8	95.4	114.4	133.4	152.4	n/a	34.1	0
AKM3	14	30	5.8	109.8	140.8	178	n/a	n/a	30.5	0
AKM4	19	40	7	118.8	147.8	176.8	205.8	n/a	33.5	0
AKM5	24	50	9	127.5	158.5	189.5	220.5	n/a	45	18.5
AKM6	32	58	11	n/a	153.7	178.7	203.7	228.7	47	18.5
AKM7	38	80	13.5	n/a	192.5	226.5	260.5	n/a	42	9.5

Model	Frame Square "B"	Mount Pilot **	Mount B.C. **
AKM1	40	30	36
AKM2	58	40	63
AKM3	70	60	75
AKM4	84	80	100

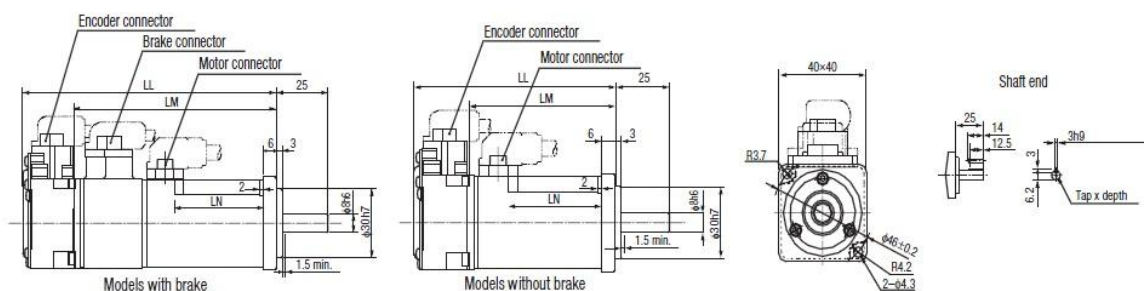
Model	Frame Square "B"	Mount Pilot **	Mount B.C. **
AKM5	108	110	130
AKM6	138	130	165
AKM7	188	180	215

Příloha č. 3

Rozměry rotačních elektrických motorů pro ACCURAX G5 od firmy OMRON

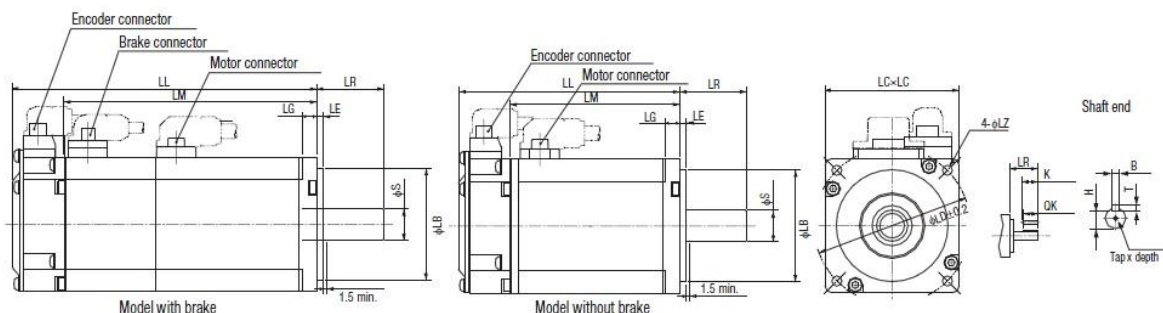
Type 3000 r/min motors (230 V, 50 - 100 W)

Dimensions (mm)		Without brake		With brake		LN	Shaft End Dimensions		Approx. Mass (Kg)	
Model		LL	LM	LL	LM		Tap x Depth		Without brake	With brake
R88M-K05030(H/T)-IS2		72	48	102	78	23	M3 x 6L		0.32	0.53
R88M-K10030(H/T)-IS2		92	68	122	98	43			0.47	0.68



Type 3000 r/min motors (230 V, 200 - 750 W)

Dimensions (mm)		Without brake		With brake		LR	Flange surface						Shaft End Dimensions							Approx. Mass Kg	
Model		LL	LM	LL	LM		LB	LC	LD	LE	LG	LZ	S	K	QK	H	B	T	Tap x Depth	Without brake	With brake
R88M-K20030(H/T)-IS2		79.5	56.5	116	93	30	50 ^{h7}	60	70	3	6.5	4.5	11 ^{h6}	20	18	8.5	4 ^{h9}	4	M4x8L	0.82	1.3
R88M-K40030(H/T)-IS2		99	76	135.5	112.5								14 ^{h6}	25	22.5	11	5 ^{h9}	5	M5x10L	1.2	1.7
R88M-K75030(H/T)-IS2		112.2	86.2	148.2	122.2	35	70 ^{h7}	80	90		8	6	19 ^{h6}		22	15.5	6 ^{h9}	6		2.3	3.1



Type 3000 r/min motors (230 V, 1 - 1.5 kW/ 400V, 750 W - 5 kW)

Dimensions (mm)		Without brake					With brake					LR	Flange surface							Shaft End Dimensions							Approx. Mass (Kg)	
Voltage	Model	LL	LM	KB1	KB2	KL1	LL	LM	KB1	KB2	KL1		LA	LB	LC	LD	LE	LG	S	Tap x Depth	K	QK	H	B	T	Without brake	With brake	
230	R88M-K□																											
	1K030(H/T)-IS2	141	97	66	119	101	168	124	66	146	101	55	135	95 ^{h7}	100	115	3	10	19 ^{h6}	M5x 12L	45	42	15.5	6 ^{h9}	6	3.5	4.5	
400	1K530(H/T)-IS2	159.5	115.5	84.5	137.5		186.5	142.5	84.5	164.5																4.4	5.4	
	75030(F/C)-IS2	131.5	87.5	56.5	109.5		158.5	114.5	53.5	136.5	103															3.1	4.1	
	1K030(F/C)-IS2	141	97	66	119		168	124	63	146																3.5	4.5	
	1K530(F/C)-IS2	159.5	115.5	84.5	137.5		186.5	142.5	81.5	164.5																4.4	5.4	
	2K030(F/C)-IS2	178.5	134.5	103.5	156.5		205.5	161.5	100.5	183.5																5.3	6.3	
	3K030(F/C)-IS2	190	146	112	168	113	215	171	112	193	113		162	110 ^{h7}	120	145	12	22 ^{h6}				41	18	8 ^{h9}	7	8.3	9.4	
	4K030(F/C)-IS2	208	164	127	186	118	233	189	127	211	118	65	165		130		6	24 ^{h6}	M8x 20L	55	51	20				11	12.6	
	5K030(F/C)-IS2	243	199	162	221		268	224	162	246																14	16	

